

Treball de Fi de Grau

## **Grau en Tecnologies Industrials**

# **Aplicació del programari Molflow+ pel càlcul del nivell de buit del Microtró de la UPC**

## **MEMÒRIA**

**Autor:** David Fernàndez Linares  
**Directors:** Francesc Xavier Escaler Puigoriol  
Youri Koubychine Merkulov

**Convocatòria:** Juny 2018



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona





## Resum

Aquest treball pretén determinar, a partir de simulacions numèriques, el nivell de buit que s'assolirà a l'interior del microtró, que s'està desenvolupant a l'Institut de Tècniques Energètiques (INTE) de la UPC, durant la seva operació.

Amb aquestes simulacions s'ha volgut determinar una relació, entre les mesures de la pressió que podem obtenir en certs punts del microtró, i la pressió que hi haurà en punts crítics dels quals no es podrà disposar d'una mesura. Aquesta relació és de gran importància per al control de la pressió i per tant per al correcte funcionament de l'accelerador. Amb el treball també es vol determinar el comportament del buit i les característiques i paràmetres que influeixen significativament en la pressió que es podrà assolir a partir del desenvolupament d'un model detallat de la cambra de buit del microtró.

Aquestes simulacions s'han dut a terme mitjançant el programa Molflow+ desenvolupat al CERN (Laboratori Europeu de Física de partícules), amb el programa es calcula la pressió mitjançant un mètode estocàstic de probabilitat de col·lisions de molècules de gas. S'han realitzat simulacions de casos senzills de sistemes de buit per entendre el funcionament del programa i donar validesa als resultats. Finalment s'ha determinat la pressió en diferents punts de la cambra de buit del microtró a partir de perfils de pressions calculats sobre superfícies de control, aquesta metodologia s'ha repetit variant paràmetres com la velocitat de bombeig i l'outgassing (desgassificació) dels materials.

Els resultats de les simulacions plasmen quantitativament la relació que hi ha entre les pressions en diferents punts d'interès del microtró, i els paràmetres propis del microtró i del sistema de buit, com és la velocitat de bombeig de la bomba de buit i la quantitat de gas que expulsen els materials presents a l'interior de la cambra de buit del microtró.

Dels resultats d'aquest treball s'obtenen unes equacions, en funció de les mesures reals del sensor i de la bomba de buit, que permeten conèixer la pressió en el punt crític del microtró. Així com equacions que ens permeten calcular els límits de càrrega de gas dintre de la cambra que serien acceptables i les velocitats mínimes de bombeig per mantenir un nivell de buit estable i que compleixi amb les especificacions corresponents.

S'arriba a la conclusió de que la cambra assolirà un nivell d'alt buit o de buit molt alt i que la principal font de gas del microtró són els imants.

# Sumari

<b>RESUM</b>	<b>3</b>
<b>SUMARI</b>	<b>4</b>
<b>1. GLOSSARI</b>	<b>7</b>
1.1. Nomenclatura.....	7
1.2. Abreviatures.....	8
<b>2. PREFACI</b>	<b>9</b>
2.1. Origen del projecte.....	9
2.2. Motivació.....	9
<b>3. INTRODUCCIÓ</b>	<b>10</b>
3.1. Objectius del projecte .....	10
3.2. Abast del projecte .....	10
<b>4. MARC TEÒRIC</b>	<b>12</b>
4.1. Introducció .....	12
4.2. Teoria del buit .....	12
4.2.1. Pressió.....	12
4.2.2. Càrrega de gas .....	14
4.2.3. Velocitat de bombeig .....	16
4.2.4. Conductància.....	16
4.3. Tecnologia del buit.....	18
4.3.1. Bombes.....	18
4.3.1.1. Turbo molecular .....	18
4.3.1.2. Iònica.....	19
4.3.2. Sensors.....	20
4.3.2.1. Pirani gauge .....	21
4.3.2.2. Hot Cathode gauge .....	21
4.4. Microtró de la UPC.....	22
<b>5. SIMULACIÓ DEL BUIT EN CASOS SIMPLES</b>	<b>25</b>
5.1. Molflow+.....	25
5.1.1. Definició dels paràmetres principals.....	26
5.2. Estudi de sistemes simples.....	27
5.2.1. Caixa de buit.....	27

5.2.2.	Conductància tub .....	30
5.2.3.	Conductància orifici.....	32
5.2.4.	Conductància tub + orifici.....	33
<b>6.</b>	<b>SIMULACIÓ DEL BUIT EN EL MICROTRÓ DE PISTA DE LA UPC</b> .....	<b>34</b>
6.1.	Model de la cambra de buit del Microtró .....	34
6.1.1.	Geometria .....	34
6.1.2.	Materials i desorció .....	39
6.1.3.	Bombes de buit .....	40
6.2.	Simulacions del sistema de buit .....	42
6.2.1.	Perfil de pressió .....	42
6.2.2.	Comparació resultats amb estudis previs.....	55
6.2.3.	Conductància del sistema .....	56
6.2.4.	Límits de càrrega de gas al sistema de buit .....	58
6.2.5.	Requeriments del bombeig .....	61
<b>7.</b>	<b>PLANIFICACIÓ TEMPORAL</b> .....	<b>62</b>
<b>8.</b>	<b>PRESSUPOST</b> .....	<b>63</b>
<b>9.</b>	<b>IMPACTE MEDI AMBIENTAL</b> .....	<b>64</b>
	<b>CONCLUSIONS</b> .....	<b>66</b>
	<b>AGRAÏMENTS</b> .....	<b>68</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>69</b>
	Referències bibliogràfiques.....	69



# 1. Glossari

**Flux molecular:** Règim de flux en el qual les molècules de gas no col·lisionen entre elles, només amb les parets, per tant poden fluir en direccions oposades sense interacció.

**Desorció:** És l'expulsió d'àtoms i/o molècules de gas de la superfície d'un sòlid o un líquid prèviament absorbides com a resultat de la col·lisió de molècules, electrons, ions i fotons, o per l'energia tèrmica a la temperatura del material.

**Outgassing:** (desgassificació en català): És la quantitat de gas que surt d'una superfície per unitat de temps en un temps específic després d'iniciar l'evacuació de gas, i que pot incloure la sublimació, l'evaporació i també la desorció.

**Bake-out:** És un procés per extreure components volàtils de materials a partir de l'aplicació de calor, és una acceleració artificial del procés d'outgassing.

**Constant de Boltzmann:** És la constant que relaciona la temperatura absoluta i l'energia i té un valor de  $1,381 \cdot 10^{-23}$  J/K.

## 1.1. Nomenclatura

**A<sub>d</sub>:** àrea amb outgassing [m<sup>2</sup>]

**d:** diàmetre [m]

**l:** longitud [m]

**A:** àrea d'una superfície [m<sup>2</sup>]

**C:** conductància [l/s]

**P:** pressió [Pa]

**Q:** càrrega de gas [Pa·l/s]

**q<sub>A</sub>:** outgassing específic per unitat d'àrea [Pa·l/s·m<sup>2</sup>]

**S:** velocitat de bombeig [l/s]

**T:** temperatura [K]

**M:** massa molecular [kg/mol]

**R<sup>2</sup>:** quadrat del coeficient de correlació de Parson d'una recta de regressió entre dues variables. És la proporció de la variància de la variable depenent que pot atribuir-se a la variància de la variable independent.

## 1.2. Abreviatures

**HV:** High Vacuum (Alt buit)

**VHV:** Very High Vacuum (Buit molt alt)

**UHV:** Ultra-High Vacuum (Ultra-alt Buit)

**INTE:** Institut de Tècniques Energètiques

**RTM:** Race Track Microtron (microtró de pista)

**UPC:** Universitat Politècnica de Catalunya

**CERN:** Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (Laboratori Europeu de Física de partícules)

**REPM:** Terres rares (imant permanent fabricat d'un aliatge de neodimi, ferro i bor)

**CAD:** Computer-Aided Design (Disseny assistit per ordinador)

**Linac:** LINear ACcelerator (Estructura d'acceleració lineal)



## 2. Prefaci

Aquest treball s'ha desenvolupat en el marc de la investigació que s'està duent a terme a l'Institut de Tècniques Energètiques (INTE) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) sobre el comportament del microtró.

### 2.1. Origen del projecte

Actualment, l'INTE de la UPC està desenvolupant un accelerador compacte d'electrons de tipus microtró. Aquest projecte s'està duent a terme en col·laboració amb l'Institut Skobeltsyn de Física Nuclear de la Universitat de Moscou.

Es disposa d'unes dades experimentals del buit del microtró, però no d'un estudi teòric complet del comportament d'aquest. És per això que l'INTE proposa desenvolupar un projecte que permeti conèixer el nivell de buit del microtró des d'un punt de vista teòric, aplicant el programari Molflow+, així com els nivells de buit que s'aconsegueix en diferents situacions plantejades per tal de determinar-ne els requeriments en el sistema de buit.

### 2.2. Motivació

Durant la realització de l'assignatura Projecte II "Disseny de sistemes d'un accelerador d'electrons", vaig entrar en contacte amb el projecte del microtró de la UPC. Més tard i gràcies a la informació rebuda pel Dr. Youri Koubychine, vaig realitzar les pràctiques curriculars al Sincrotró ALBA de Cerdanyola del Vallés, en el departament de buit on s'em va despertar l'interès en aquest tema. Quan em va ser proposat aquest treball d'anàlisi del buit del microtró em va motivar el fet de col·laborar amb la investigació de la universitat, especialment en el departament de mecànica de fluids i poder aportar i augmentar coneixements sobre el tema.

El buit és un camp de la ciència en ple desenvolupament, on encara queda molt per estudiar. Tenir l'oportunitat de col·laborar en un projecte pioner com aquest i fer un estudi que permetrà realitzar experiments de buit i dotar de recursos al futurs investigadors i tècnics que treballaran amb el microtró de la UPC, ha estat motivador i satisfactori.

Aquest treball és l'ampliació d'un estudi previ que ha servit de punt de partida i permetrà entendre el comportament del buit al microtró.

## 3. Introducció

### 3.1. Objectius del projecte

L'objectiu del treball és simular mitjançant el programari Molflow+ el nivell de buit dins de la cambra de buit del Microtró, que s'està desenvolupant a l'INTE de la UPC, en diferents condicions de funcionament.

Els objectius específics són els següents:

- ✓ Comprendre i validar fórmules analítiques de càlcul del buit disponibles a la literatura mitjançant la simulació de casos senzills en règim estacionari.
- ✓ Verificar a partir dels casos senzills la correcta utilització del programari Molflow+ i la seva validesa.
- ✓ Desenvolupar el model detallat de la cambra de buit del microtró.
- ✓ Dur a terme simulacions del perfil de pressió dins de la cambra de buit en règim estacionari.
- ✓ Establir la relació entre les pressions en els punts crítics del microtró i el valor de la pressió al punt de localització del sensor de control i el valor de la pressió a la bomba de buit.
- ✓ Establir el límit d'outgassing màxim de la cambra de buit que permeti mantenir un nivell de pressió acceptable per al funcionament del microtró.

### 3.2. Abast del projecte

Aquest projecte és la continuació del treball de fi de màster titulat "Simulació del nivell d'ultra-buit del Microtró de la UPC" de l'estudiant Anna Viladomiu. En aquest primer treball es van desenvolupar els conceptes bàsics sobre la simulació de l'UHV en el Microtró de la UPC, i es van realitzar unes simulacions preliminars amb Molflow+ per calcular el nivell de buit en el seu interior.

En el treball actual es realitzaran simulacions més acurades i en condicions de treball més properes a les reals. Així doncs, aquest treball ha de servir com a referència per realitzar en un futur les mesures experimentals de buit al microtró de forma satisfactòria i utilitzar de forma correcta els elements de generació i mesura del buit per assolir la pressió mínima necessària a les zones crítiques per on passarà el feix d'electrons.

## 4. Marc teòric

### 4.1. Introducció

Actualment existeixen diversos acceleradors d'electrons com el linac (linear accelerator), el sincrotró, el betatró i el microtró, aquests són aparells de major o menor grandària que proporcionen energia als electrons accelerant-los mitjançant un camp elèctric, generalment d'alta freqüència. Depenent de l'energia a la qual són accelerats els electrons poden tenir aplicacions en camps com la indústria, la medicina i la investigació científica.

En els acceleradors lineals l'energia acumulada a l'electró està limitada per la longitud del aparell. Als acceleradors circulars la trajectòria dels electrons es corba mitjançant camps magnètics produïts per imants, permetent que l'electró circuli més cops per la mateixa trajectòria circular passant per la mateixa estructura d'acceleració.

Quan es parla de partícules, cal especificar l'ordre de magnitud d'aquestes. El radi d'un electró és de l'ordre d'1 femtòmetre ( $1\text{e-}15\text{ m}$ ) mentre que el radi de les molècules presents a l'aire com l' $\text{N}_2$ , l' $\text{O}_2$  i l' $\text{H}_2$  són de l'ordre de 50 picòmetres ( $5\text{e-}11\text{ m}$ ), es a dir 50000 cops més grans. Si un electró accelerat impacta contra una molècula de l'aire, aquest perd la seva energia. Per tant alhora d'accelerar electrons i d'altres partícules subatòmiques, cal reduir la quantitat de molècules que es trobaran en la trajectòria dels electrons, això s'aconsegueix realitzant el buit.

### 4.2. Teoria del buit

#### 4.2.1. Pressió

La pressió (P) és la magnitud física que mesura la força instantània per unitat de superfície, aplicada en direcció perpendicular a aquesta. La seva unitat en el SI és el pascal, que equival a una força d'un newton que actua uniformement sobre un metre quadrat. Altres unitats utilitzades són, per exemple, el mil·límetre de mercuri, el bar i l'atmosfera.

La pressió que exerceix un gas uniformement a través de la superfície d'un contenidor es pot descriure mitjançant teoria cinètica simple. Les partícules d'un gas es mouen contínuament en direccions aleatòries i sovint col·lideixen amb les parets del contenidor i/o entre elles. La suma de tots els components normals de la força exercida per les partícules que impacten a les parets del contenidor dividida per l'àrea de les parets és definida com la pressió. Es pot dir que la pressió és el moment lineal mitjà d'aquestes partícules en moviment i la seva velocitat aleatòria és suficient per definir-la.

La llei de Dalton o de les pressions parcials estableix que la pressió total que exerceix una barreja de gasos és igual a la suma de les pressions parcials que exerceix individualment cadascun dels gasos que componen la barreja [1]. La proporció de gasos presents a l'aire depèn de la pressió a la que es troba el gas (Figura 4.1).

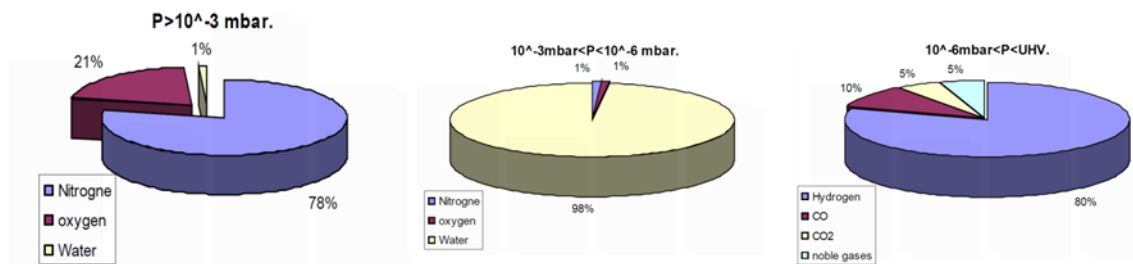


Figura 4.1. Proporció de gasos en l'aire [2]

Quan es parla de buit es refereix a un recipient ple de gas a una pressió inferior a l'atmosfèrica, segons la Societat Nord-americana del Buit (AVS). Això vol dir que la densitat de partícules de gas és inferior que la que existeix a l'atmosfera. Es a dir, la pressió depèn de la quantitat de partícules per unitat de volum presents en un recipient (Figura 4.2).

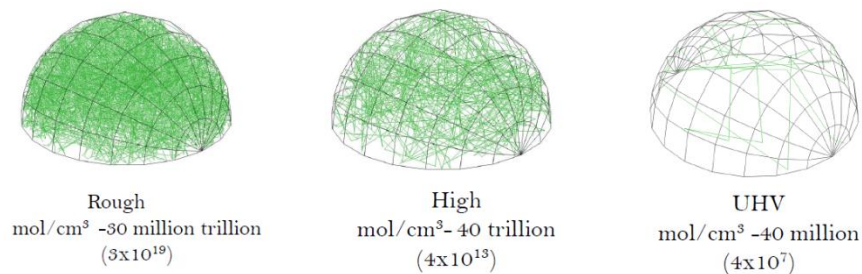


Figura 4.2. Densitat de partícules en un volum [1]

Les molècules de gas en el buit es mouen a mesura que col·lisionen, aquestes col·lisions conserven l'energia, així que després de cada impacte la velocitat de la partícula canvia. S'estipula que totes les velocitats són possibles però no amb la mateixa probabilitat. La velocitat mitjana de les partícules quan es descriu un flux molecular calculada per Maxwell i Boltzmann, en funció de la massa molecular del gas i la temperatura és:

$$v = \left( \frac{8kT}{\pi m} \right)^{1/2} \quad (\text{Eq. 1})$$

Segons la densitat d'aquestes partícules, el buit es pot classificar en rangs, en els quals les propietats dels gasos varien (Taula 4.1).

Rangs de buit		Unitats de pressió			
		Pa		mbar	
		min	max	min	max
<b>Low</b>	<b>(LV)</b>	$3,3 \times 10^3$	$1,0 \times 10^5$	$3,3 \times 10$	$1,0 \times 10^3$
<b>Medium</b>	<b>(MV)</b>	$1,0 \times 10^{-1}$	$3,3 \times 10^3$	$1,0 \times 10^{-3}$	$3,3 \times 10$
<b>High</b>	<b>(HV)</b>	$1,0 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-1}$	$1,0 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-3}$
<b>Very High</b>	<b>(VHV)</b>	$1,0 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-9}$	$1,0 \times 10^{-6}$
<b>Ultra-High</b>	<b>(UHV)</b>	$1,0 \times 10^{-10}$	$1,0 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-12}$	$1,0 \times 10^{-9}$
<b>Extreme Ultra-High</b>	<b>(XHV)</b>	$< 1,0 \times 10^{-10}$		$< 1,0 \times 10^{-12}$	

Taula 4.1. Rangs de buit [1]

#### 4.2.2. Càrrega de gas

La càrrega de gas  $Q$  (mbar·l/s) (*throughput*) es la quantitat de gas (el volum de gas a una pressió coneguda) que passa per un pla en un temps conegut [3].

Aquesta càrrega de gas prové de diferents fonts, aquestes fonts s'han de considerar per separat abans de poder definir-les com una càrrega total.

Les possibles fonts de gas d'un sistema de buit són les següents (Figura 4.3):

- Desorció: Alliberament d'àtoms o molècules prèviament absorbits per una superfície arran de la col·lisió de molècules, electrons, ions, o fotons; o per l'energia tèrmica a la temperatura del material [3].
- Difusió: Les molècules dels materials que conformen el sistema de buit es desprenen i augmenta la quantitat de gas del sistema [4].
- Fuita real: És l'entrada de gasos de l'exterior a través d'unions mal segellades [4].
- Fuita virtual: És l'injecció de gasos al sistema de buit provinents de volums interiors

que han quedat plens de gas [4].

- Permeabilitat: És el pas de gasos de l'atmosfera a través dels materials [4].
- Evaporació: Al disminuir la pressió del sistema, els possibles líquids presents a l'interior d'aquest s'evaporen augmentant el nombre de molècules de gas [4].
- Flux revers: Molècules de gas que ja han sigut bombejades fora poden quedar atrapades a les bombes i poden tornar a entrar al sistema de buit [4].

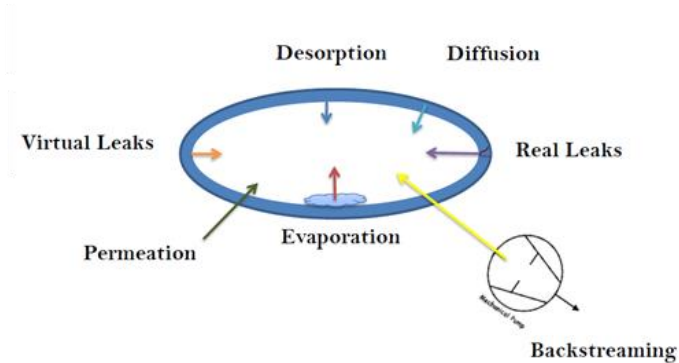


Figura 4.3. Fonts de gas d'un sistema de buit [1]

Un concepte important dels sistemes de buit és l'*outgassing*, la quantitat de gas que surt d'una superfície per unitat de temps, en un temps específic després de l'inici de l'evacuació, concepte que engloba la desorció [3].

Fonts de gas com la desorció, la difusió i la permeabilitat no es poden evitar, però es poden reduir si es fan servir materials adients.

Per conèixer la carrega de gas,  $Q_A$ , provinent de l'*outgassing* d'una superfície,  $A_d$ , en  $\text{cm}^2$ , es pot determinar un *outgassing* específic per unitat d'àrea,  $q_A$ , en  $\text{mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ , que multiplicada per aquesta àrea equivaldrà a [2]:

$$Q_A = q_A \cdot A_d \quad (\text{Eq.2})$$

### 4.2.3. Velocitat de bombeig

Per reduir la pressió en un sistema de buit és necessari extreure el gas de l'interior d'aquest i això es fa per mitja de bombes. Hi ha bombes de diferents tipus amb diferents propietats però totes tenen una característica comuna, la velocitat de bombeig.

En el cas de bombeig d'aire, la pressió d'un sistema de buit serà directament proporcional a la càrrega de gas,  $Q_{total}$ , i inversament proporcional a la quantitat de gas que s'expulsa per unitat de temps anomenada velocitat de bombeig,  $S$ , en l/s [1].

$$P = \frac{Q_{total}}{S} \quad (Eq.3)$$

Definim velocitat de bombeig com el flux volumètric de gas transportat a través d'un pla [6] per mitjà d'una bomba de buit.

La velocitat de bombeig real de la bomba a través del pla d'entrada a la bomba només depèn de les característiques d'aquesta i del tipus de gas. Quan es té una geometria complexa es pot determinar un bombeig efectiu,  $S_{ef}$ , en algun altre punt diferent de la bomba. Aquest bombeig estarà condicionat per la conductància,  $C$ , també en l/s, que hi ha entre la bomba i el pla on es vol mesurar, de la següent manera [1]:

$$\frac{1}{S_{ef}} = \frac{1}{C} + \frac{1}{S_{bomba}} \quad (Eq.4)$$

A continuació s'entrarà en detall amb el terme conductància.

### 4.2.4. Conductància

La conductància,  $C$  (l/s), és el factor de proporcionalitat que relaciona el flux a través de qualsevol element geomètric amb la diferència de pressió entre l'inici,  $P_1$ , i el final d'aquest,  $P_2$  [1].

$$C = \frac{Q}{P_2 - P_1} \quad (Eq.5)$$

Les conductàncies del sistema ens condicionaran la pressió que es podrà assolir, faran variar la pressió en diferents punts ja que no permetran que la velocitat de bombeig sigui la mateixa en tot el sistema.



Quan tenim geometries complexes, es pot plantejar l'analogia amb la llei d'Ohm dels circuits elèctrics. Per obtenir el valor de la conductància total,  $C_{total}$ , tenim que [2]:

Per conductàncies en sèrie,  $C_1$  i  $C_2$ :

$$\frac{1}{C_{total}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (Eq.6)$$

Per conductàncies en paral·lel,  $C_1$  i  $C_2$ :

$$C_{total} = C_1 + C_2 \quad (Eq.7)$$

En rangs d'alt buit i d'ultra-alt buit (flux molecular) la conductància és independent de la variació de pressió i només depèn de la geometria, el gas i la temperatura. El tipus de gas i la temperatura, estan definits amb velocitat mitjana de les partícules,  $v$ , en m/s. Hi ha conductància en tubs i obertures. Per calcular-les podem aplicar les següents fórmules [7].

Per un tub de diàmetre,  $d$ , en cm, i longitud,  $l$ , en cm, obtenim una conductància entre l'inici i el final d'aquest,  $C_{tub}$ , en l/s, de [3]:

$$C_{tub} = \frac{\pi}{120} v \frac{d^3}{l} \quad (Eq.8)$$

Per un orifici amb secció d'obertura,  $A$ , en  $\text{cm}^2$  podem determinar la conductància,  $C_{obertura}$ , en l/s, amb l'equació [3]:

$$C_{obertura} = \frac{v}{40} \cdot A \quad (Eq.9)$$

Aplicant l'analogia dels circuits elèctrics, quan tenim un tub que connecta amb una cambra de buit la conductància total,  $C_{total}$ , queda de la forma [3]:

$$\frac{1}{C_{total}} = \frac{1}{C_{tub}} + \frac{1}{C_{obertura}} \quad (Eq.10)$$

Aquesta fórmula té un error elevat per casos intermedis on el diàmetre,  $d$ , és de l'ordre de magnitud de la longitud,  $l$ . Així doncs combinant les equacions 8, 9 i 10, a partir de mesures experimentals i aplicant un factor de correcció,  $a$ , la conductància completa d'un tub en l/s queda [3]:

$$C_{tub} = a \cdot \frac{v}{40} \cdot A \quad (Eq.11)$$

Aquest factor de correcció,  $a$ , es la probabilitat de transmissió de les molècules en tubs i està tabulada valent 1 per la relació  $l/d=0$  i  $4d/3l$  quan la relació  $l/d=\infty$  [3].

## 4.3. Tecnologia del buit

### 4.3.1. Bombes

Per poder generar el buit a l'interior d'un sistema calen bombes que extreguin les molècules de gas presents. No totes les bombes serveixen pel mateix rang de pressions, generalment cal fer servir dues o més bombes de diferent tipus per tal d'assolir el nivell de buit desitjat (Figura 4.4). Si s'activa una bomba en un rang de pressions fora del seu abast, aquesta es pot fer malbé.

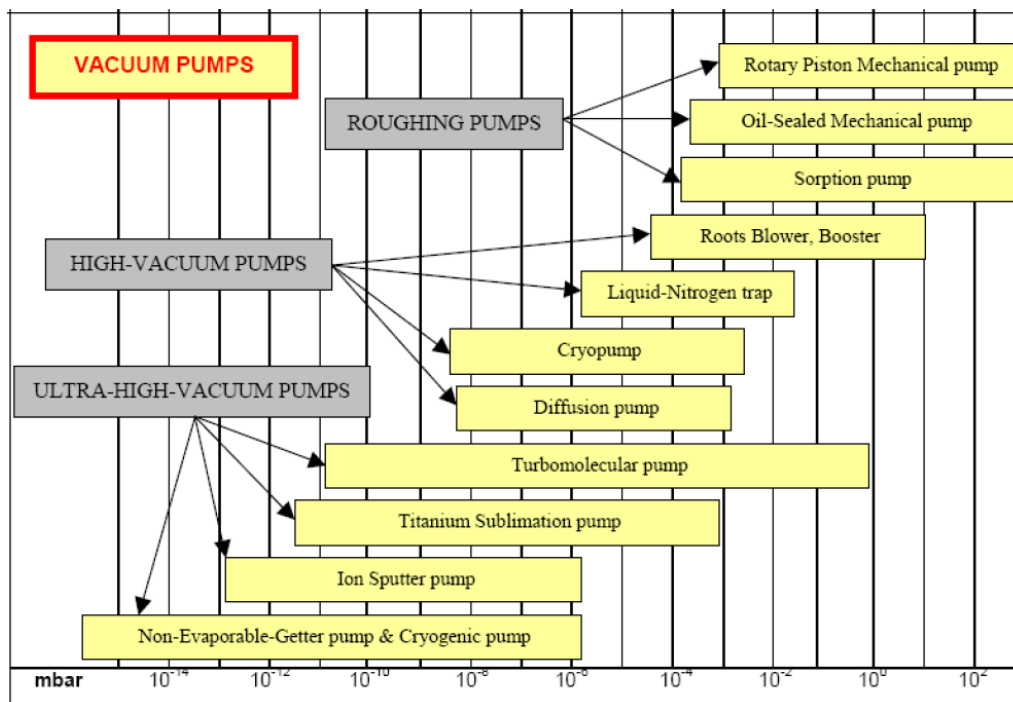


Figura 4.4. Rang de funcionament de les bombes de buit [1].

A continuació entrarem en més detall amb les bombes turbo moleculars i iòniques, presents en el sistema de buit del Microtró.

#### 4.3.1.1. Turbo molecular

En una bomba turbo molecular (Figura 4.5), un rotor de turbina que gira a gran velocitat (~30000 rpm) colpeja repetidament les molècules de gas amb uns àleps, orientats de tal manera que la major probabilitat de transmissió sigui de la regió d'alt buit a la de baix buit (Figura 4.6), transferint un moment en la direcció desitjada i impulsant-les des de l'entrada fins la descàrrega.



Figura 4.5. Interior bomba turbo molecular.[5]

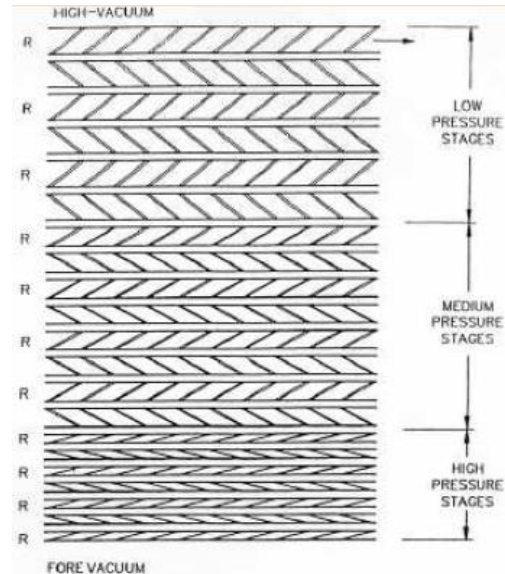


Figura 4.6. Orientació àleps de la bomba turbo molecular [2]

S'aconsegueixen graus d'alt i d'ultra-alt buit, però la bomba turbo molecular necessita primer una bomba mecànica per tal d'assolir inicialment una pressió inferior a l'atmosfèrica a l'interior del sistema.

En el rang de flux molecular ( $P < 10^{-3}$  mbar) les molècules impacten principalment amb els àleps del rotor fent que el procés de bombeig sigui molt efectiu, però en el cas de flux laminar ( $P > 10^{-1}$  mbar) l'efecte del rotor disminueix pels impactes freqüents de les molècules entre si.

Al tenir un funcionament mecànic, no tenen un límit de capacitat de bombeig.

#### 4.3.1.2. Iònica

El principi de bombeig d'aquestes bombes es basa en l'adsorció química en la que una superfície adsorbent queda coberta per una sola capa de molècules, àtoms o ions mitjançant forces químiques (enllaços covalents), i en l'adsorció física, on les molècules o àtoms s'uneixen a la superfície mitjançant forces de Van der Waals.

Per aconseguir això es genera un camp magnètic d'alta intensitat y posteriorment s'aplica un voltatge elèctric alt, fet que genera un núvol d'electrons que queda atrapat en el camp magnètic. Les col·lisions d'aquests electrons amb les molècules de gas les ionitza, de manera que es poden capturar en un càtode (Figura 4.7). No hi ha vibracions ni moviments mecànics de cap part.

La pressió inicial per començar a bombejar ha de ser inferior a  $10^{-6}$  mbar. La velocitat de bombeig és sensible al tipus de gas (poc efectiva amb gasos nobles que no s'ionitzen), a la mida de l'entrada, a la pressió i a la història de la bomba. La història de la bomba són les hores que ha estat en funcionament, si ha atrapat un nombre considerable de molècules, l'efectivitat disminuirà. Al ser una bomba de tipus capturadora de gas, té una capacitat limitada.

Poden operar des de  $10^{-6}$  fins  $10^{-11}$  mbar, tenen una potència de consum baixa i una vida útil llarga.

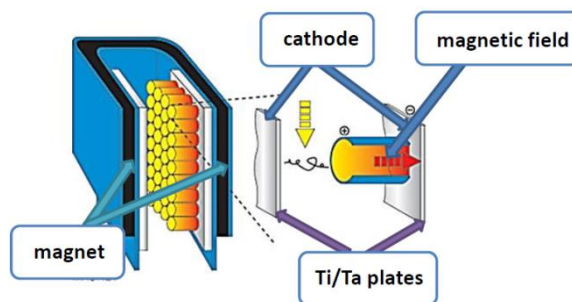


Figura 4.7. Elements de la bomba iònica[6].

La bomba iònica també funciona com a sensor aplicant una conversió al corrent que hi ha a l'interior, permetent-nos saber la pressió a l'entrada d'aquesta.

#### 4.3.2. Sensors

La mesura de la pressió total es pot fer de tres maneres diferents:

- i. Mesura directa, a partir de la mesura de la força del gas en una superfície, ( $P = \text{força}/\text{àrea}$ ).
- ii. Mesures indirectes, quan es mesuren propietats físiques del gas com la conductivitat tèrmica, la viscositat, la ionització, la densitat, etc.
- iii. Mesura de la pressió parcial, quan es mesura la ionització i es filtren els gassos depenent de la massa.

Igual que en les bombes, els sensors també treballen per rangs de pressió (Figura 4.8). Durant el transitori la pressió disminueix des de la pressió atmosfèrica fins el mínim buit assolible. Si volem saber la pressió en aquests rangs intermedis per poder activar i/o desactivar les bombes ens caldrà més d'un sensor. S'entrarà en més detall amb els sensors Pirani i Hot Cathode, que són els utilitzats per mesurar la pressió al Microtró.

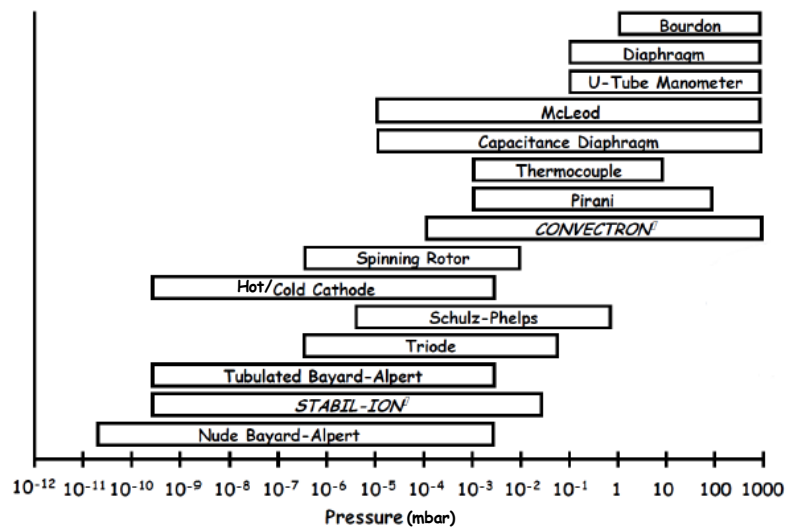


Figura 4.8. Rang de funcionament dels sensors de buit [2].

#### 4.3.2.1. Pirani gauge

Consisteix en un filament metàl·lic, de resistència variable amb la temperatura, suspès en el sistema de buit que es vol mesurar. El filament està connectat a un circuit elèctric que després d'un calibratge permetrà llegir la pressió.

Quan les molècules de gas impacten contra el filament, aquest perd calor que absorbeixen les molècules. Si la pressió del gas disminueix, el número de molècules que impactaran contra el filament també disminuirà proporcionalment i el filament perdrà calor més lentament. Mesurar la pèrdua de calor és una indicació indirecta de la pressió (Figura 4.9).

El sensor es pot utilitzar quan es tenen pressions entre 0,6 mbar i  $10^{-4}$  mbar. Quan la pressió disminueix més, la conductivitat tèrmica del gas es torna encara més petita i es difícil mesurar-la de manera precisa.

#### 4.3.2.2. Hot Cathode gauge

En aquest sensor, un corrent regulat d'electrons es emès des d'un filament calent, i són atrets a una reixeta helicoidal per un potencial de voltatge positiu. La majoria dels electrons travessen la reixeta i impacten amb les molècules de gas que hi ha al volum tancat fent que una part d'aquestes molècules s'ionitzin. Els ions de gas són atrets a un filament central per mitjà d'un voltatge negatiu generant un corrent que es amplifica i que està directament relacionat amb la pressió (Figura 4.10).

El corrent d'ions d'un gas de composició constant es directament proporcional a la densitat molecular del gas en el sensor. El sensor funciona en el rang de pressions entre  $10^{-2}$  y  $10^{-9}$  mbar.

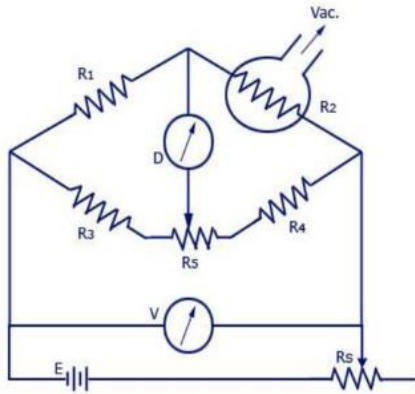


Figura 4.9. Esquema del funcionament d'una pirani gauge [7]

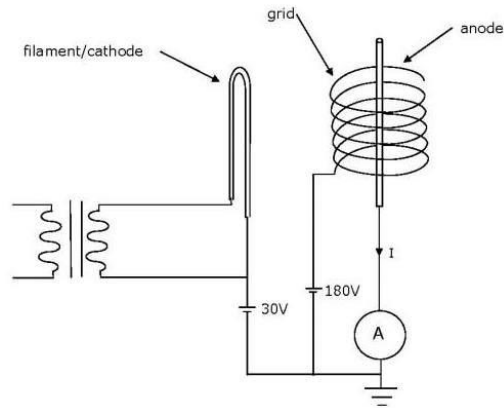


Figura 4.10. Esquema del funcionament d'una hot cathode gauge [8].

#### 4.4. Microtró de la UPC

A l'INTE de la UPC s'està desenvolupant un accelerador d'electrons de baixa energia de tipus microtró de pista (*race-track microtron, RTM*), en col·laboració amb l'institut Skobeltsyn de Física Nuclear de la Universitat de Moscow.

El principi de funcionament d'un microtró de pista s'explica a la següent (Figura 4.11):

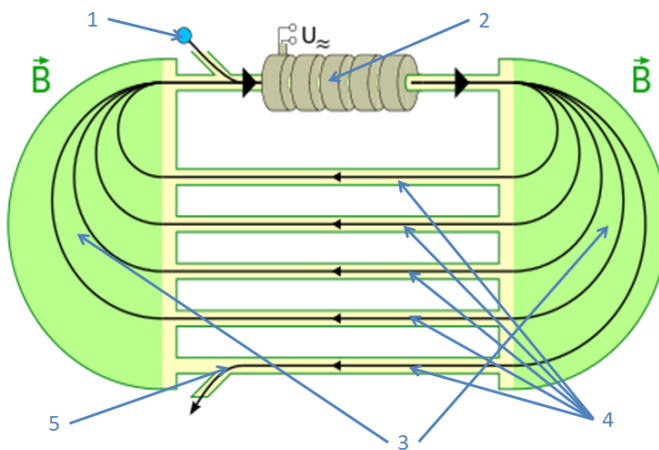


Figura 4.11. Microtró de pista [9]

Des d'una font d'electrons (canó d'electrons) (1) les partícules s'injecten al linac del microtró (2), el linac accelera els electrons i els hi aporta un guany energètic. Quan el feix d'electrons entra a l'interior del imant (3), el seu camp magnètic corba la trajectòria dels electrons 180°, i aquest són dirigits cap a un altre imant (3) que torna a corbar la trajectòria i fa que el feix torni a passar pel linac. Un altre cop dintre del linac, els electrons guanyen més energia gràcies a que tornen a ser accelerats. Després de repetir un número concret de cops aquest recorregut (4), en la última trajectòria un altre imant (5) desvia els electrons fent que es dirigeixin cap a la sortida del microtró.

Els paràmetres principals del microtró de la UPC són els que s'indiquen a la Taula 4.2.

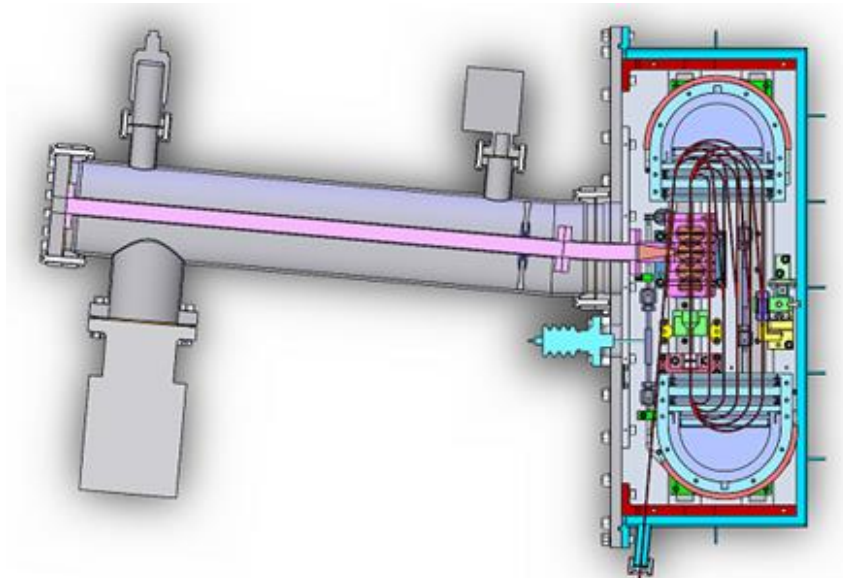
Paràmetre	Valor
<b>Energies del feix</b>	6, 8, 10, 12 MeV
<b>Freqüència operacional</b>	5712 MHz
<b>Guany energètic per volta</b>	2 MeV
<b>Camp magnètic dels imants</b>	0.8 T
<b>Energia d'injecció</b>	25 keV
<b>Potència del pols de RF</b>	<750 kW
<b>Mida del capçal del RTM</b>	578x200x123 mm
<b>Pes del capçal del RTM</b>	~100 kg

*Taula 4.2. Paràmetres del microtró de la UPC*

En el disseny del microtró de la UPC està determinada la següent especificació:

- ✓ El sistema de buit ha de subministrar un bombeig al microtró que permeti assolir un nivell de buit inferior a  $5 \cdot 10^{-6}$  mbar a la zona crítica que és l'interior dels imants. [4]

La Figura 4.12 mostra la vista en planta del model 3D del microtró de la UPC, amb la disposició dels elements que el conformen.



*Figura 4.12. Model 3D del microtró de la UPC*



## 5. Simulació del buit en casos simples

### 5.1. Molflow+

Molflow+ es un programa desenvolupat al CERN que permet calcular la pressió en una geometria arbitrària complexa quan les condicions d'ultra-alt buit són conegudes. El nom prové del terme en anglès *molecular flow*, la condició que es dona quan el recorregut lliure de les molècules és tan llarg que en comparació amb la mida de la geometria es poden negligir les col·lisions entre elles. És en aquest cas, quan les partícules es mouen lliurement, que s'aplica el mètode de Monte Carlo per a les simulacions [10].

El mètode de Montecarlo és un mètode numèric que permet resoldre problemes físics i matemàtics mitjançant la simulació de variables aleatòries.[11]

El programa carrega una geometria en format CAD del tipus STL (*Standard Triangle Language*) on només queden definides superfícies, el programa també et permet dissenyar geometries a partir de vèrtex i d'altres superfícies. La versió utilitzada en aquest treball és la 2.6.69 del 24 de maig de 2018 (Figura 5.1).

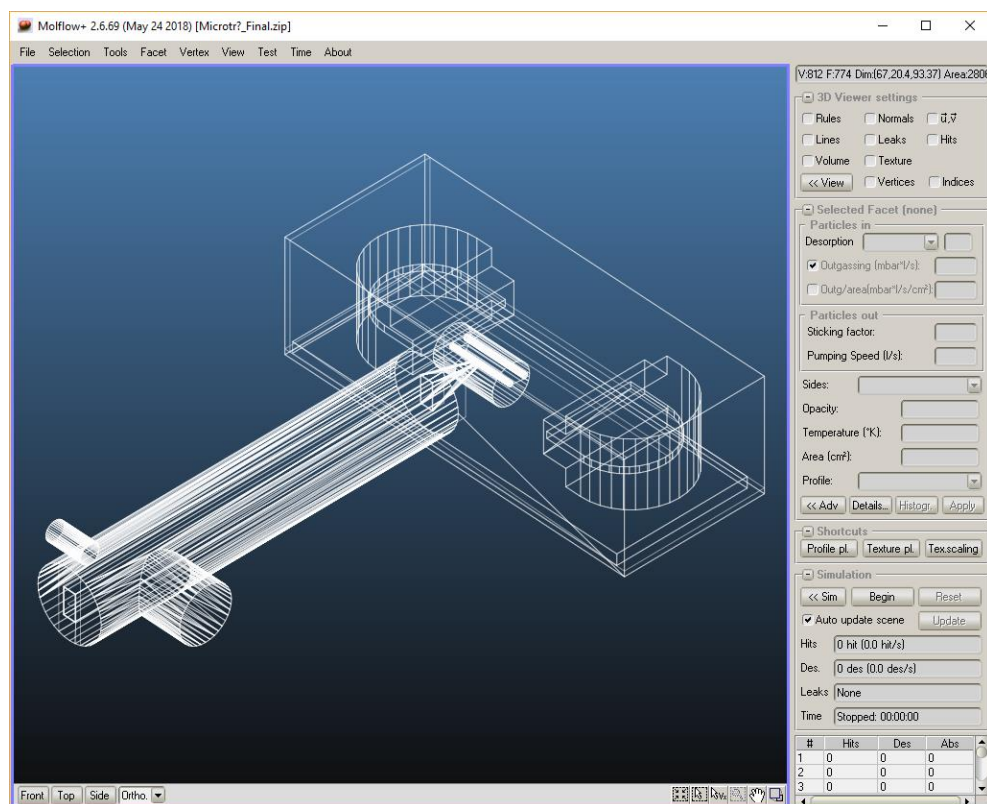


Figura 5.1. Interfície de Molflow+

### 5.1.1. Definició dels paràmetres principals

#### 1. Tipus de gas:

Molflow+ només pot simular la pressió amb un únic tipus de gas, permet escollir la massa molecular i tota la resta de paràmetres s'han de definir en funció d'aquest gas.

#### 2. Superfícies:

En les superfícies presents de la geometria es poden definir paràmetres com la opacitat (si deixa passar les partícules o no), si es vol que la superfície simuli en les dues cares o en una i la temperatura d'aquesta.

#### 3. Outgassing:

Es defineix la ràtio d'outgassing de totes les superfícies presents en la geometria, s'ha d'indicar que la component normal d'aquestes estigui dirigida a l'interior del sistema, es pot definir un outgassing total en mbar·l/s o per unitat de superfície en mbar·l/s·cm<sup>2</sup>

#### 4. Velocitat de bombeig:

En una superfície es defineix la velocitat de bombeig en l/s, el programa defineix la velocitat de bombeig com una adsorció de molècules, es a dir, les partícules que impacten contra aquestes superfícies s'hi queden atrapades. Aquí apareix un factor important anomenat *Sticking Factor* que es la relació de partícules que impacten en la superfície entre les que s'hi queden atrapades, aquest factor ha de ser inferior a 1. Això fa que la velocitat de bombeig màxima que es pot definir estigui limitada per la grandària de la superfície, no es poden adsorbir més partícules de les que impacten.

#### 5. Mallat de les superfícies:

En les superfícies es pot definir un mallat en celes/cm<sup>2</sup> on es comptabilitza l'outgassing, adsorció, reflexió o traspàs de les partícules entre d'altres paràmetres.

#### 6. Perfils d'estudi:

En una superfície mallada es pot veure el perfil de pressió en una de les seves direccions, aquest perfil es divideix en 100 trams iguals, la longitud dels trams dependrà de la longitud total de la superfície mallada. Aquesta superfície ha de ser rectangular.

## 5.2. Estudi de sistemes simples

Aquest estudi es realitza amb la intenció de veure les diferències dels paràmetres que s'obtenen amb Molflow+ i els resultats teòrics de l'aplicació de les equacions de l'apartat **4.2 Teoria del buit**.

Les simulacions es realitzen amb un  $q_A$  de  $9,33 \times 10^{-12}$  mbar·l·s<sup>-1</sup>·cm<sup>-2</sup> (outgassing específic de l'acer inoxidable [13]) i una  $v$  de 1761,23 m·s<sup>-1</sup> (velocitat mitja de les partícules d'H<sub>2</sub> a 293,15 K). S'han agafat aquests valors per tal que les simulacions fossin semblants a un possible estudi experimental fet amb cambres i tubs d'acer inoxidable (el material més utilitzat en tecnologies de buit) i a una temperatura ambient.

### 5.2.1. Caixa de buit

La primera fórmula que es compararà amb Molflow+ és la de la pressió final dintre d'un sistema de buit, que és funció del outgassing total i de la velocitat de bombeig efectiva tal com es veu en l'equació 3.

Les primeres simulacions es fan amb dues cambres cúbiques, una de costat 25 cm i l'altre de costat 50 cm amb bombeig,  $S = 150$  l/s, en una de les seves cares (Figura 5.2). Es prenen com a superfícies d'estudi els plans horitzontals mig i inferior de la cambra i la cara oposada a la superfície de bombeig.

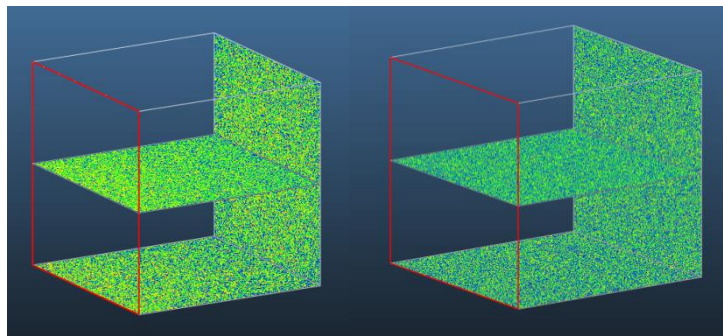


Figura 5.2. Simulacions Cambres  $c=25$  cm i  $c=50$  cm

El perfil de pressions de les cares de la primera cambra de costat 25 cm dona un valor mig a totes tres superfícies de  $1,95 \times 10^{-10}$  mbar com es pot veure a la Figura 5.3.

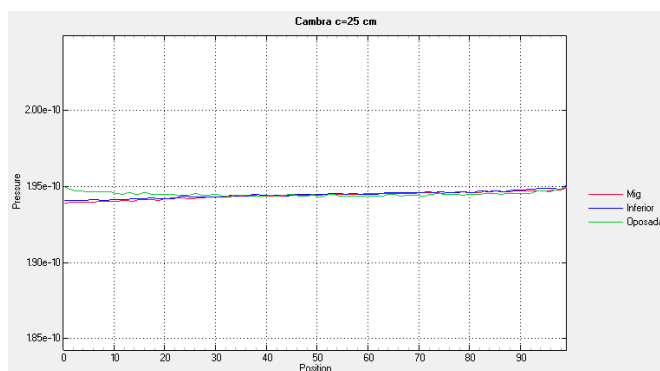


Figura 5.3. Pressió cambra  $c=25$  cm

El valor mig de les pressions de les tres superfícies de la segona cambra de costat 50 cm és de  $7,78 \times 10^{-10}$  mbar (Figura 5.4).

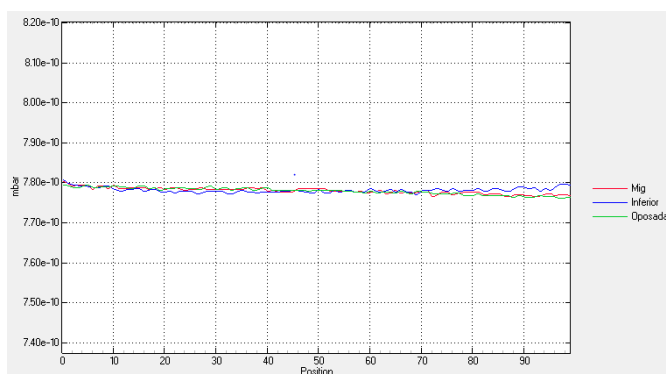


Figura 5.4. Pressió cambra  $c=50$  cm

S'estudien 3 casos més, tots ells en cambres de costat,  $c$ , 50 cm, amb orificis de bombeig situats en una de les cares (Figura 5.5), els orificis són de diàmetre,  $d_o$ , 10 cm, 20 cm i 1 cm.

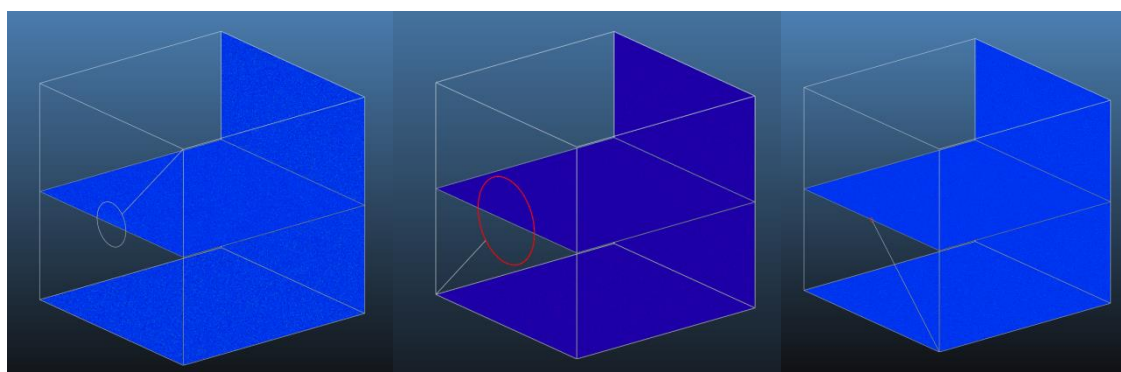


Figura 5.5. Cambres de costat 50 cm amb orificis de 10 cm, 20 cm i 1 cm de diàmetre.

A la Taula 5.1 es mostra el resum de pressions de totes les simulacions i les pressions teòriques. La  $S$  de la cambra d'orifici de diàmetre 1 cm val 34 l/s ja que aquest és el màxim que es pot obtenir degut al *Sticking Factor*.

c [cm]	$A_d$ [cm <sup>2</sup> ]	$S_{ef}$ [l/s]	$d_o$ [cm]	$P_{sim}$ [mbar]	$P_{eq,3}$ [mbar]	% dev
25	3125,0	150	0	1,95E-10	1,94E-10	0,32
50	12500,0	150	0	7,78E-10	7,78E-10	0,06
50	14921,5	150	10	9,27E-10	9,28E-10	0,12
50	14685,8	150	20	9,13E-10	9,13E-10	0,05
50	14999,2	34	1	4,11E-09	4,12E-09	0,15

Taula 5.1. Resum pressions cambres de buit

La  $P_{sim}$ , s'obté fent la mitja de les pressions de les tres superfícies obtingudes amb Molflow+ i la  $P_{eq,3}$ , és la pressió que s'obté amb l'equació 3, dividint la càrrega de gas entre la velocitat de bombeig. Molflow+ compleix a la perfecció l'equació 3 sense importar la geometria de la superfície de bombeig, a la Taula 5.1 es mostra la desviació estàndard de la diferència d'aquestes pressions i és inferior a l'1%.

### 5.2.2. Conductància tub

A continuació es simulen casos de tubs de buit per comparar els resultats de la conductància obtinguda amb Molflow+ (equació 7) amb les fórmules analítiques (equacions 8 i 11).

Es simulen 7 tubs de diàmetre,  $d$ , de 10 cm, àrea de secció,  $A_s$ , de 78,54 cm<sup>2</sup> i longitud,  $l$ , variable. La bomba està situada en un dels extrems del tub, una superfície horitzontal a la meitat de la secció del tub ens servirà per calcular el perfil de pressió i les altres superfícies presenten  $q_A$ . Un exemple de les simulacions són la Figura 5.6 i la Figura 5.7.

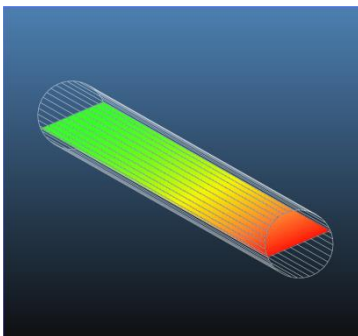


Figura 5.6. Tub  $l=500\text{cm}$

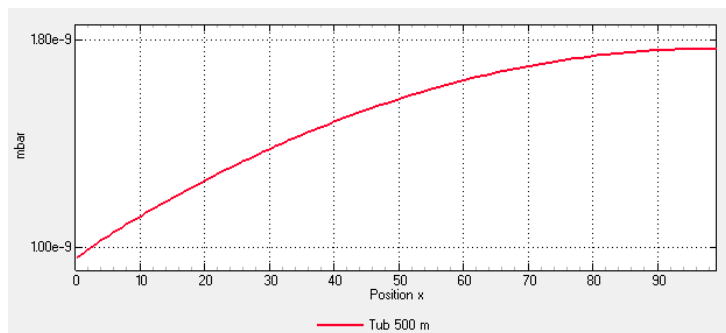


Figura 5.7. Perfil de pressió tub  $l=500\text{cm}$

La Taula 5.2 mostra els resultats de les simulacions, on  $P_1$  és la pressió a la bomba i  $P_2$  la pressió a l'extrem del tub.

a	$l[\text{cm}]$	$l/d$	$A_d [\text{cm}^2]$	$P_1[\text{mbar}]$	$P_2[\text{mbar}]$
0,51420	10	1	392,70	1,90E-11	1,96E-11
0,19099	50	5	1649,34	9,95E-11	1,10E-10
0,10938	100	10	3220,13	1,94E-10	2,32E-10
0,05949	200	20	6361,73	3,83E-10	5,23E-10
0,04097	300	30	9503,32	5,77E-10	8,76E-10
0,03127	400	40	12644,91	7,70E-10	1,30E-09
0,02529	500	50	15786,50	9,57E-10	1,77E-09

Taula 5.2. Simulació pressió tubs

La Taula 5.3 mostra les conductàncies en l/s obtingudes per Molflow+ aplicant l'equació 5,  $C_{eq.5}$ , i les obtingudes teòricament amb les fórmules analítiques (equacions 8,  $C_{eq.8}$ , i 11,  $C_{eq.11}$ ).

$l/d$	$C_{eq.5}$	$C_{eq.8}$	$C_{eq.11}$
1	6106,47	4612,7	1778,18
5	1465,55	922,54	660,47
10	790,63	461,27	378,25
20	423,96	230,63	205,73
30	296,54	153,76	141,68
40	222,6	115,32	108,14
50	181,17	92,25	87,46

Taula 5.3. Conductàncies dels tubs

Amb el programa Molflow+ no es pot obtenir el valor de la conductància d'una geometria directament. A partir de l'equació 5, amb la diferència de pressions entre  $P_1$  i  $P_2$  i coneixent  $Q_A$  obtenim un valor de conductància. Com s'ha explicat en l'apartat 4.2.4, en rangs d'alt buit i d'ultra-alt buit (flux molecular) la conductància és independent de la variació de pressió i només depèn de la geometria, el gas i la temperatura. Per tant no es pot afirmar que el valor d'aquesta conductància sigui correcte. Amb les equacions 8 i 11 també obtenim un valor de conductància, a mesura que la relació  $l/d$  augmenta els valors de les conductàncies són més semblants. Tot i això, aquest valor no el podem comparar amb cap resultat de Molflow+.

Molflow+ permet calcular la pressió en diferents punts i qualitativament es veu com existeix una conductància entre el punt final i inicial d'un tub. Queda clar també que aquesta conductància disminueix a mesura que la relació  $l/d$  creix.

### 5.2.3. Conductància orifici

Com s'ha vist en l'apartat anterior no podem comparar les conductàncies amb Molflow+ i les fórmules analítiques, però es vol estudiar l'efecte d'aquesta conductància.

Les simulacions es realitzen amb una geometria que consisteix en dues cambres de costat,  $c$ , 7,5 cm unides per una de les seves cares amb un orifici de diàmetre,  $d_o$ , variable, un exemple de les simulacions són la Figura 5.6 i la Figura 5.7.

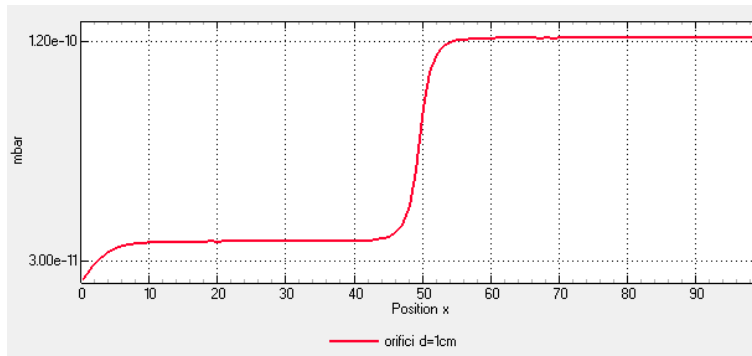


Figura 5.6. Perfil pressió orifici  $d=1\text{cm}$

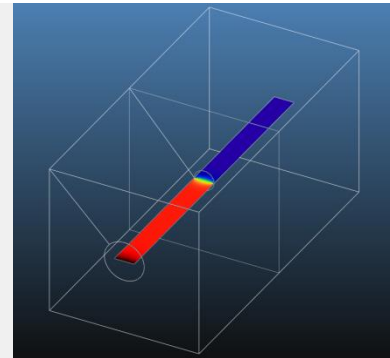


Figura 5.7. Orifici  $d=1\text{cm}$

La Taula 5.4 mostra els resultats de les simulacions on  $P_1$  és la pressió a l'interior de la cambra on hi ha la bomba i  $P_2$  la pressió a l'altra cambra.  $C_{eq,5}$  és la conductància que s'obté de Molflow+ aplicant l'equació 5, i  $C_{eq,9}$  és la conductància que s'obté aplicant l'equació 9, totes dues conductàncies en l/s.

$A_d$ [cm <sup>2</sup> ]	$d_o$ [cm]	$P_1$	$P_2$	$C_{eq,5}$	$C_{eq,9}$
670,3	1	3,87E-11	1,22E-10	75,08	345,81
671,47	0,5	4,25E-11	3,79E-10	18,62	86,45
671,72	0,3	4,24E-11	9,74E-10	6,73	31,12
671,84	0,1	4,24E-11	8,44E-09	0,75	3,46

Taula 5.4. Simulació de pressió a través d'un orifici

Qualitativament en el perfil de pressió, (Figura 5.6), s'aprecia l'efecte de la conductància d'un orifici. Els valors que s'obtenen d'aquestes conductàncies aplicant les equacions 5 i 9 són molt diferents i no es pot concloure que uns valors siguin més encertats que els altres. Es pot afirmar que a mesura que el diàmetre del forat disminueix la conductància també disminuirà.



#### 5.2.4. Conductància tub + orifici

El que es pretén amb la següent simulació és veure de manera qualitativa l'efecte de la suma d'aquestes conductàncies.

La simulació que es duu a terme es la d'una geometria composta per un tub i una cambra de buit (Figura 5.8), s'estudia la pressió al llarg de tres superfícies que van des de l'inici del tub on hi ha la bomba fins al final de la cambra de buit (Figura 5.9).

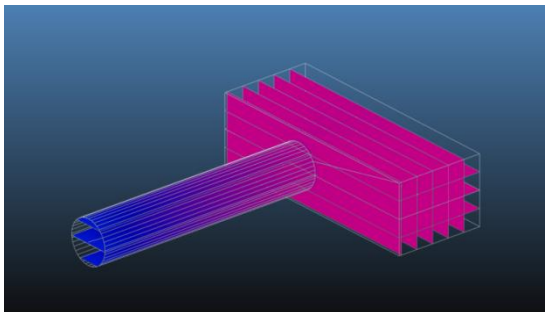


Figura 5.8. Simulació tub i cambra

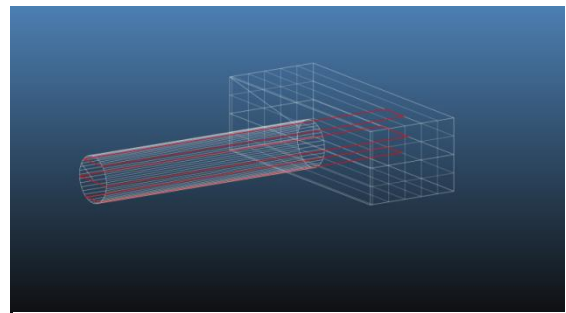


Figura 5.9. Superfícies d'estudi

Els perfils de pressió (Figura 5.10) mostren com hi ha un salt a l'entrada de la cambra que es degut a l'efecte de la conductància de l'orifici, es pot afirmar doncs que la conductància total del sistema es una barreja de les dues conductàncies.

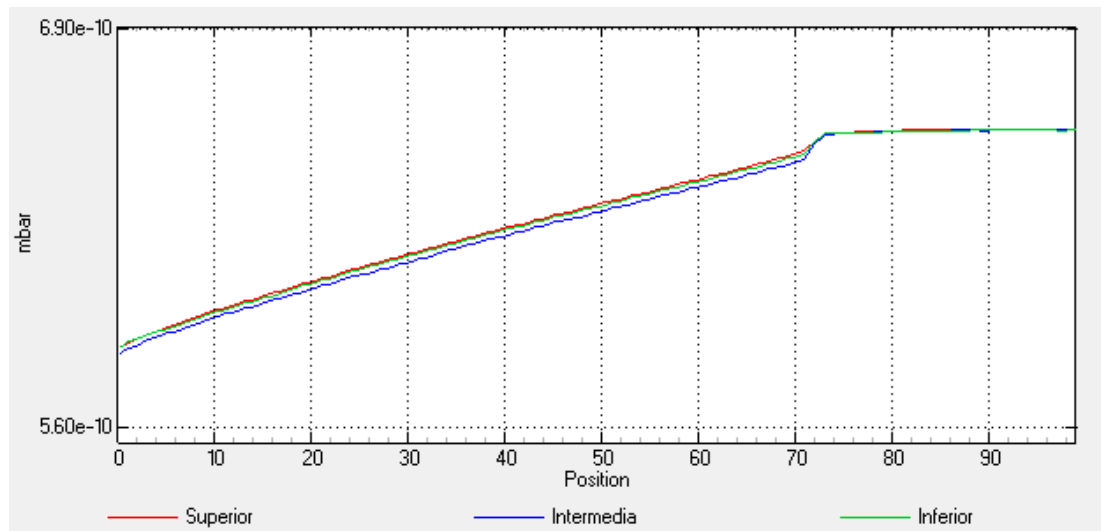


Figura 5.10. Perfils de pressió tub i cambra

## 6. Simulació del buit en el microtró de pista de la UPC

### 6.1. Model de la cambra de buit del Microtró

#### 6.1.1. Geometria

Per simular els nivells de pressió dintre del microtró s'ha dissenyat una geometria amb Solidworks i Molflow+, procurant mantenir al màxim la geometria, les dimensions i disposició dels elements principals que conformen el microtró real (Figura 6.1 i Figura 6.2).

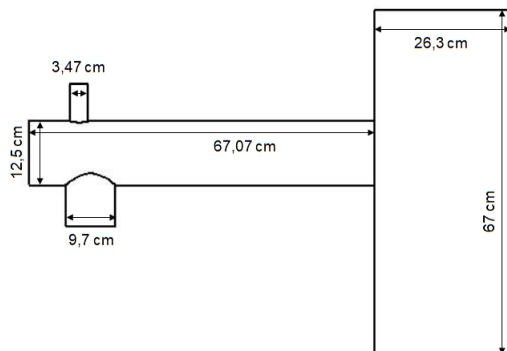


Figura 6.1 Dimensions del microtró.

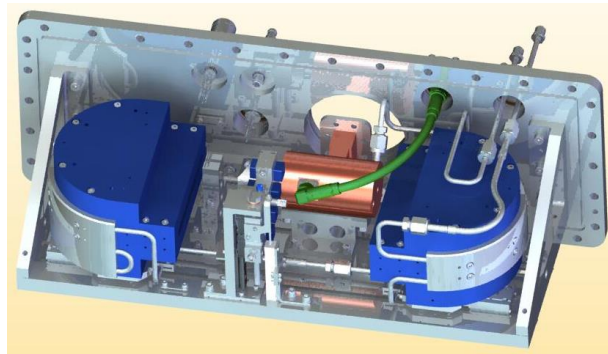


Figura 6.2 Il·lustració 3D de l'interior de la cambra de buit del microtró.

S'ha partit d'un model elaborat prèviament, s'ha afegit la placa de suport dels elements del microtró, s'ha modificat la guia d'ona i l'entrada d'aquesta al linac, tancant del tot aquestes cavitats. Els elements presents en la geometria de simulació del model complet són el tub de buit amb colzes, la cambra de buit, la guia d'ona dins del tub, el linac (estructura d'acceleració), els dos imants de curvatura del feix i la placa de recolzament (Figura 6.3).

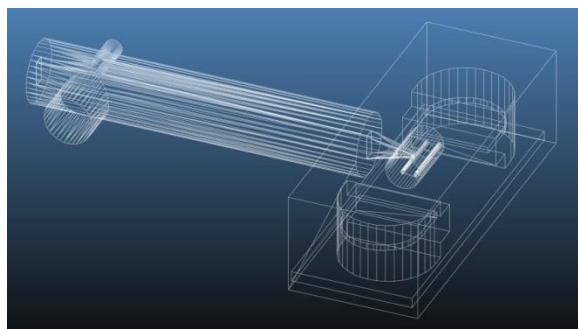


Figura 6.3. Model complet del microtró per simular amb Molflow+

Per poder fer l'estudi s'han creat unes superfícies on es mesurarà la pressió. Aquestes superfícies són rectangulars, la variació de la pressió es mesura respecte la longitud  $x$  del costat més llarg de la superfície. La distància  $x$  de totes elles va de 0 a 100, fent que cada interval d' $x$  tingui un valor diferent per cada superfície, depenent de la llargària d'aquesta. A continuació es mostra un exemple (Figura 6.4) d'una de les superfícies, concretament la superfície 6, la posició de la qual en el microtró es pot veure en la Figura 6.5 i la Figura 6.6.

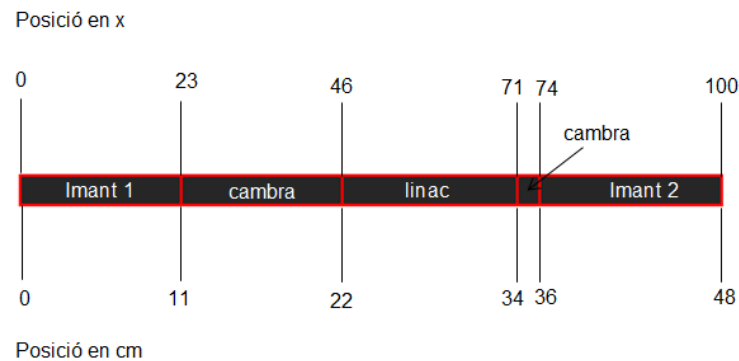


Figura 6.4. Relació entre la posició  $x$  i la real en cm de la superfície 6.

En total s'han afegit 9 superfícies al model del microtró per poder realitzar un estudi complet dels perfils de pressió en tots els punts d'interès. La Figura 6.5 i la Figura 6.6 mostren la distribució espacial d'aquestes superfícies

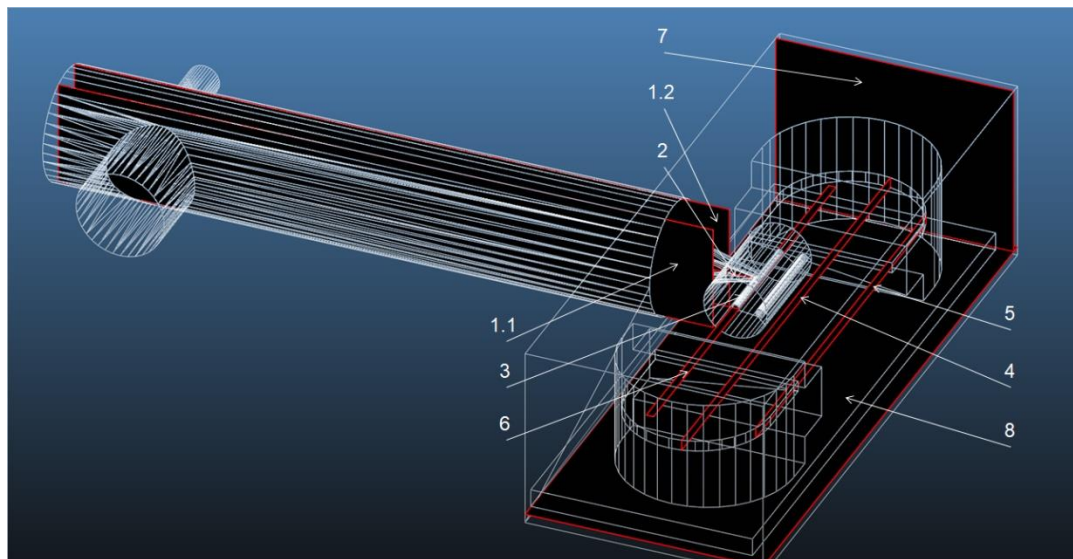


Figura 6.5. Distribució de les superfícies d'estudi en el microtró

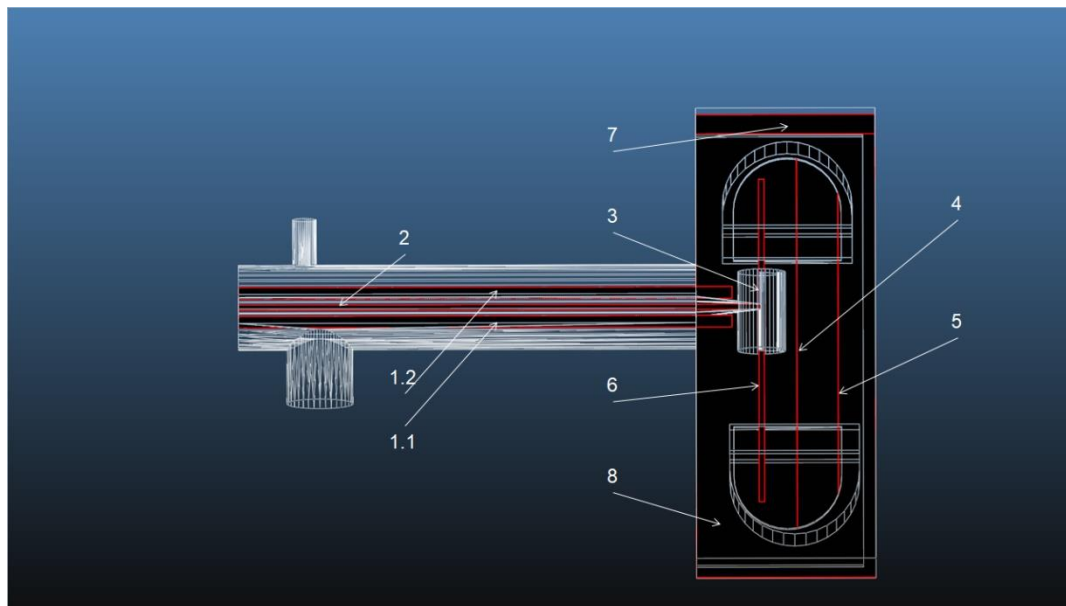


Figura 6.6. Distribució de les superfícies d'estudi en el microtró. (vista en planta)

A continuació es farà una descripció detallada de cada una de les superfícies d'estudi presents en el model del microtró. Les taules que es mostren amb les descripcions d'algunes de les superfícies, són les relacions entre la posició respecte x dels punts d'interès de la superfície i la posició real en cm del punt.

- Tub bombeig iònica (1.1)(Figura 6.5 i Figura 6.6): Superfície vertical que va des de l'inici del tub principal de bombeig fins a l'interior de la cambra de buit gairebé a tocar del linac, entre el costat més proper a la bomba iònica i la guia d'ona (Taula 6.1).
- Tub bombeig turbo (1.2) (Figura 6.5 i Figura 6.6): Superfície idèntica a la 1.1 entre el costat més proper a la bomba turbo molecular i la guia d'ona (Taula 6.1).

Distància	Inici del tub	Bomba	Sensor	Final del tub	Final
<b>x</b>	0	15	80	72,29	100
<b>Real [cm]</b>	0	13,9	74,21	67,07	72,37

Taula 6.1. Punts d'interès de les superfícies 1.1 i 1.2

- Guia d'ona (2) (Figura 6.5 i Figura 6.6): Superfície horitzontal que recorre tota la guia d'ona fins l'entrada al linac (Taula 6.2).

Distància	Inici guia	linac
<b>x</b>	0	100
<b>Real [cm]</b>	0	76,28

Taula 6.2. Punts d'interès de la superfície 2

- Linac (3) (Figura 6.5 i Figura 6.6): Superfície horitzontal a l'interior del linac (Taula 6.3).

Distància	Inici linac	Final linac
<b>x</b>	0	100
<b>Real [cm]</b>	0	11,67

Taula 6.3. Punts d'interès de la superfície 3

- Imant-Cambra-Imant (4) (Figura 6.5 i Figura 6.6): Superfície vertical d'altura 1,2 cm que va des d'un imant fins l'altre, situada a una distància d'1,67 cm del linac (Taula 6.4).

Distància	Inici Imant1	Fi imant1	Inici imant2	Fi imant2
<b>x</b>	0	27	72	100
<b>Real [cm]</b>	0	15,08	39,84	54,92

Taula 6.4. Punts d'interès de la superfície 4

- Imant-Cambra-Imant (5) (Figura 6.5 i Figura 6.6): Superfície vertical d'altura 1,2 cm que va des d'un imant fins l'altre, situada a una distància de 7,72 cm del linac (Taula 6.5).

Distància	Inici Imant1	Fi imant1	Inici imant2	Fi imant2
<b>x</b>	0	22	77	100
<b>Real [cm]</b>	0	10	34,76	44,76

Taula 6.5. Punts d'interès de la superfície 5

- Imant-Cambra-linac-cambra-imant (6) (Figura 6.5 i Figura 6.6): Superfície horitzontal que va d'imant a imant travessant per dintre del linac (Taula 6.6).

Distància	Inici imant1	Fi imant1	Inici linac	Fi linac	Inici imant2	Fi imant2
<b>x</b>	0	23	46	71	74	100
<b>Real [cm]</b>	0	11,12	22,48	34,16	35,88	48

*Taula 6.6. Punts d'interès de la superfície 6*

- Cambra horitzontal (7) (Figura 6.5 i Figura 6.6): Superfície horitzontal a una distància d'1 cm del terra de la cambra.
- Cambra vertical (8) (Figura 6.5 i Figura 6.6): Superfície vertical situada a 1 cm de la paret esquerra de la cambra.

### 6.1.2. Materials i desorció

El material principal del qual està fet el microtró es l'acer inoxidable, aquest material presenta uns valors d'outgassing adients si ha rebut els tractaments superficials correctes (Taula 6.7). Els valors d'outgassing varien depenent del gas, en nivells d'alt buit i d'ultra alt buit, el gas que predomina en l'aire en un 80% es l' $H_2$ , per tant els valors d'outgassing que agafarem seran respecte el gas hidrogen.

Cada acer presenta outgassings diferents, en les simulacions prèvies, l'outgassing d' $H_2$  escollit va ser de  $6,67 \times 10^{-13} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$  [12], un valor força optimista i que te en compte la realització d'un bake-out. Per les futures simulacions s'agafa el valor de  **$9,33 \times 10^{-12} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$**  [13], tret de la mateixa font però sense tenir en compte el bake-out (Taula 6.8). De totes maneres l'aportació de gas de l'outgassing de l'acer és molt inferior que l'aportació de l'outgassing del material dels imants com es veurà més endavant.

Material	$q_A [\text{mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}]$
Acer inoxidable (304)	$2 \times 10^{-8}$
Acer inoxidable (304, electropolit)	$6 \times 10^{-9}$
Acer inoxidable (304, mecànicament polit)	$2 \times 10^{-9}$
Acer inoxidable (304, electropolit, 30 h a 250 °C)	$4 \times 10^{-12}$

Taula 6.7. Outgassings específics per diferents acers [2]

$H_2 [\text{mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}]$	UNBAKED (10h)	BAKED (50h, 150°C)
<b>Acer inoxidable</b>	$9,33 \times 10^{-12}$	$6,67 \times 10^{-13}$

Taula 6.8. Outgassing específic de l'acer [13]

Els imants estan fets amb terres rares (REPM), material amb un outgassing específic per unitat d'àrea de  **$1,57 \times 10^{-7} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$**  [14], aquest valor de  $q_A$  serà l'utilitzat en les simulacions. La Taula 6.9 mostra els valors de  $A_d$ ,  $q_A$  i  $Q_A$  dels diferents materials.

$A_d$	$q_A$	$Q_A$
Acer ( $19169,58 \text{ cm}^2$ )	$9,33 \times 10^{-12} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$	$1,78 \times 10^{-7} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$
REPM ( $849,09 \text{ cm}^2$ )	$1,57 \times 10^{-7} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$	$1,33 \times 10^{-4} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$

Taula 6.9. Aportacions totals de gas al sistema.

Com es veu en la Taula 6.9 l'acer representa el 95,75% de la superfície del microtró, tot i això la càrrega de gas  $Q_A$  que aporta és menyspreable si ho comparem amb l'aportació de gas dels imants. Les terres rares tenen una  $Q_A$  de  $1,33 \times 10^{-4} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$ , en contra d'una  $Q_A$  de  $1,78 \times 10^{-7} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$  de l'acer.

### 6.1.3. Bombes de buit

L'assoliment del buit al microtró es realitza per mitjà de dues bombes, una bomba turbo molecular (Minitask AG81 ISO63) i una iònica (Vaclon Plus 75). A continuació es mostra l'esquema dels sistemes de buit pel bombeig de la bomba turbo molecular i la bomba iònica (Figura 6.7).

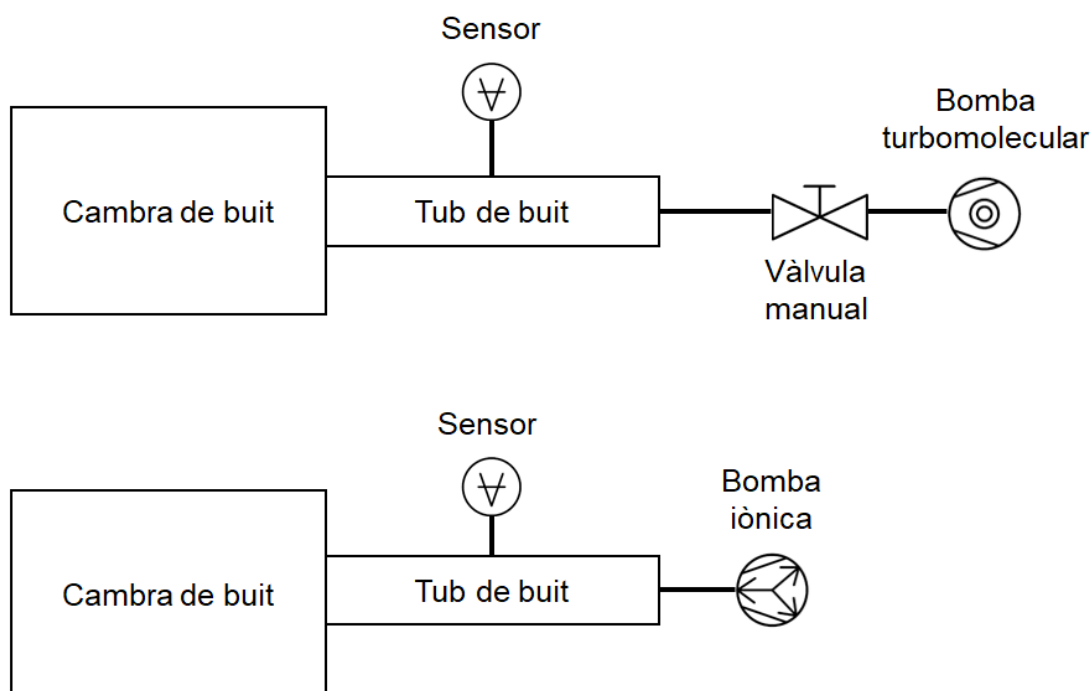


Figura 6.7. Esquema sistemes de buit.

El primer sistema en entrar en funcionament és el de la bomba turbo molecular que s'activa quan el buit assolit dintre del sistema per mitjà d'una bomba mecànica és de  $10^{-2} \text{ mbar}$ . Un cop s'assoleix una pressió òptima perquè entri en funcionament la bomba iònica, aquesta s'activa i es tanca la vàlvula del sistema de la bomba turbo molecular. El segon sistema bombeja fins assolir una pressió final estacionària i continua actiu per mantenir el nivell de buit. A continuació es mostren les principals característiques de cada bomba (Taula 6.10 i Taula 6.11), la seva situació en el model a simular (Figura 6.10) i la seva forma (Figura 6.8 i Figura 6.9).



Vaclon Plus 75	
Característica	Valor
Velocitat bombeig per H <sub>2</sub> (l/s)	150
Pressió màxima d'engegada (mbar)	$\leq 1 \times 10^{-3}$
Pressió mínima de funcionament (mbar)	$> 10^{-11}$
Temperatura màxima baking (°C)	350
Pes (kg)	19

Taula 6.10. Característiques Vaclon Plus 75  
[15]



Figura 6.8 . Vaclon plus 75 [15]

Minitask AG81 ISO63	
Característica	Valor
Velocitat bombeig per H <sub>2</sub> (l/s)	40
Pressió màxima d'engegada (mbar)	$\leq 1 \times 10^{-2}$
Pressió mínima de funcionament (mbar)	$> 2 \times 10^{-7}$
Temperatura màxima baking (°C)	80
Pes (kg)	16,4

Taula 6.11. Característiques Minitask AG81  
[16]



Figura 6.9 . Minitask AG81 ISO63 [16]

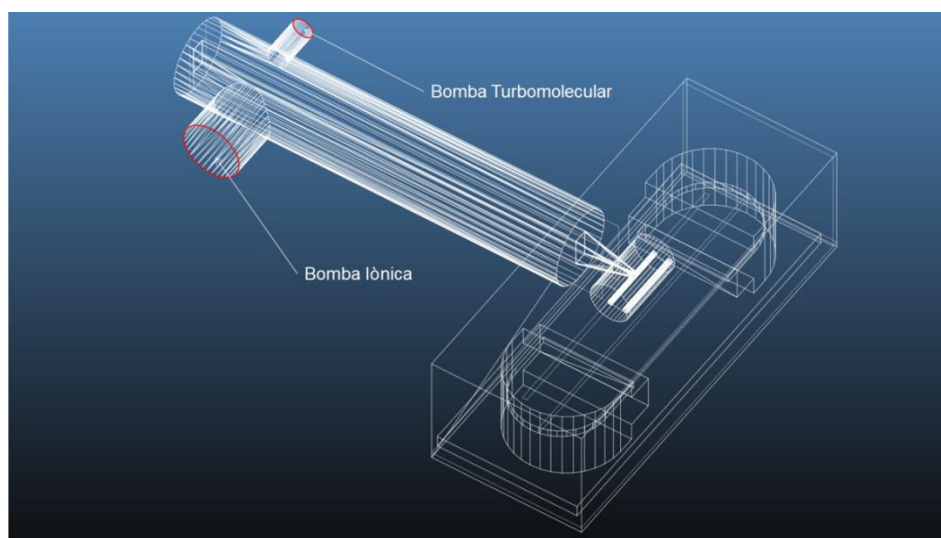


Figura 6.10. Ubicació en el model de la bomba turbomolecular i iònica

## 6.2. Simulacions del sistema de buit

### 6.2.1. Perfil de pressió

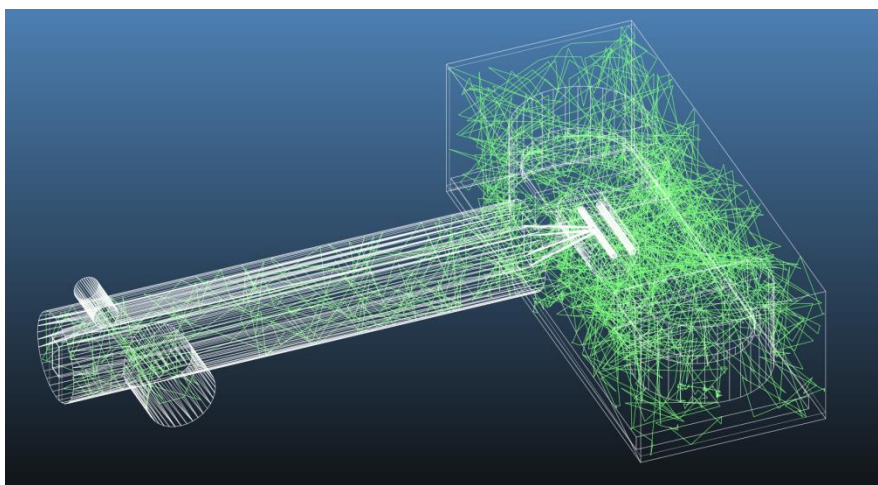
Un cop completada la geometria del microtró cal definir els paràmetres de la simulació mostrats a la Taula 6.12 amb els corresponents valors.

<b>Velocitat de bombeig</b>	150 l/s
<b>Gas simulat</b>	H <sub>2</sub> (M=2g/mol)
<b>Outgassing acer</b>	$9.33 \cdot 10^{-12} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$
<b>Outgassing Imants</b>	$1,57 \cdot 10^{-7} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$
<b>Temperatura superfícies</b>	293,15 K
<b>Superfícies d'estudi amb mallat</b>	9
<b>Mallat</b>	100 celes/cm <sup>2</sup> (total=41992471 celes)

*Taula 6.12. Paràmetres de la simulació*

La simulació s'ha dut a terme en un ordinador amb processador Intel(R) Core(TM) i7-8700 CPU 3,20 GHz i 16Gb de memòria RAM.

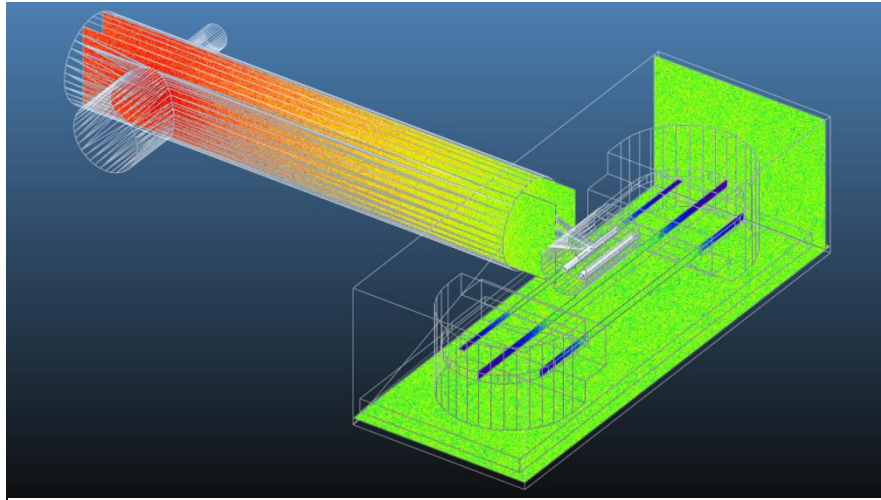
La simulació amb un nombre total de 100Ghits d'impactes contra les superfícies internes del sistema de buit requereix 4,85 Gb de memòria RAM i té una duració de 7 hores. Cada hit és l'enregistrament de la col·lisió, la desorció o l'adsorció d'una partícula en una superfície. En la Figura 6.11 es mostren en un segon concret les trajectòries de les 2048 últimes partícules presents en la simulació.



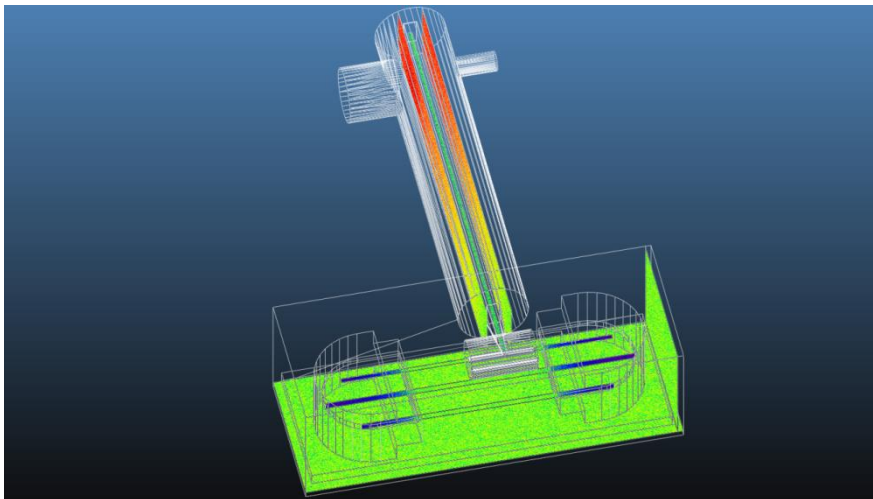
*Figura 6.11. Trajectòries de partícules simulades*

Un cop finalitzada la simulació, aplicant una escala de color, que va des del violeta (punts de pressió màxima) fins el vermell (punts de pressió mínima), a les superfícies d'estudi, obtenim la representació de la Figura 6.12 i la Figura 6.13.

Només queden pintades les superfícies on s'ha fet un mallat (cada celda del mallat és d'un únic color depenent de la pressió mitja d'aquesta) i s'ha determinat el perfil de pressió d'estudi. Les superfícies acolorides són les mostrades en la Figura 6.5 i la Figura 6.6.



*Figura 6.12. Simulació de pressió del microtró (vista 1)*



*Figura 6.13. Simulació de pressió del microtró (vista 2)*

A continuació es mostren els resultats més detallats dels perfils de pressió de les superfícies estudiades (Figura 6.5 i Figura 6.6) amb el valor de la pressió dels punts que ens interessa conèixer la pressió tabulats.

Tub bombeig iònica (1.1) i Tub bombeig turbo molecular (1.2) (Figura 6.5 i Figura 6.6):

La Figura 6.14 mostra el perfil de pressió respecte la longitud d'aquesta superfície.

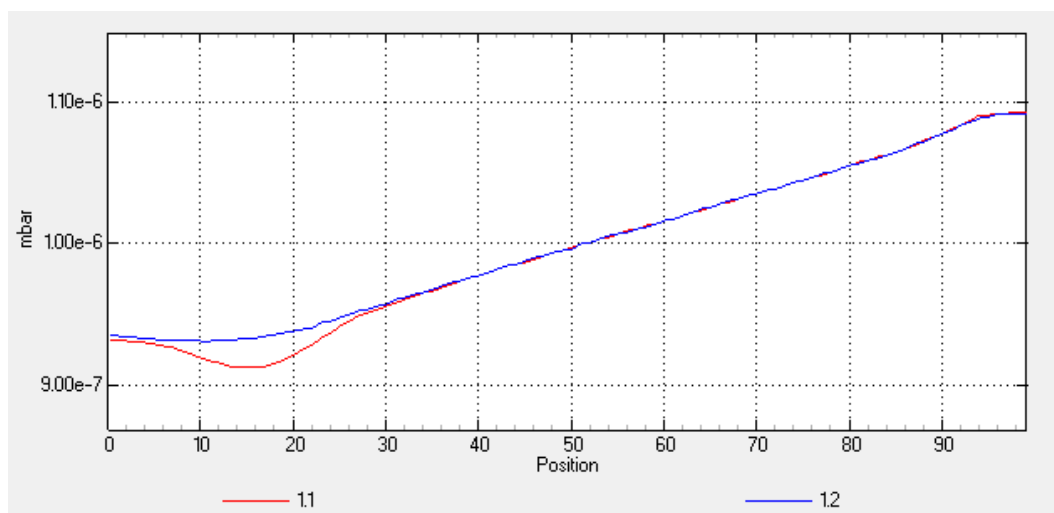


Figura 6.14. Perfil pressió superfície 1.1 i 1.2

En la superfície propera a la bomba iònica es pot veure un descens significatiu de la pressió en el colze on està situada la bomba, a mesura que s'avança pel tub de bombeig les pressions de les dues superfícies s'igualen fins arribar a la cambra del microtró (Taula 6.13). També es pot observar com hi ha una conductància que fa que la pressió no sigui constant en tot el tub.

Punts d'interès	Bomba iònica	Sensor	Cambra
<b>mbar</b>	$9,14 \times 10^{-7}$	$1,06 \times 10^{-6}$	$1,09 \times 10^{-6}$

Taula 6.13. Pressions superfícies 1.1 i 1.2

Guia d'ona (2) (Figura 6.5 i Figura 6.6):

La Figura 6.15 mostra el perfil de pressió respecte la longitud de la guia d'ona, des de l'inici del tub de bombeig fins l'entrada al linac.

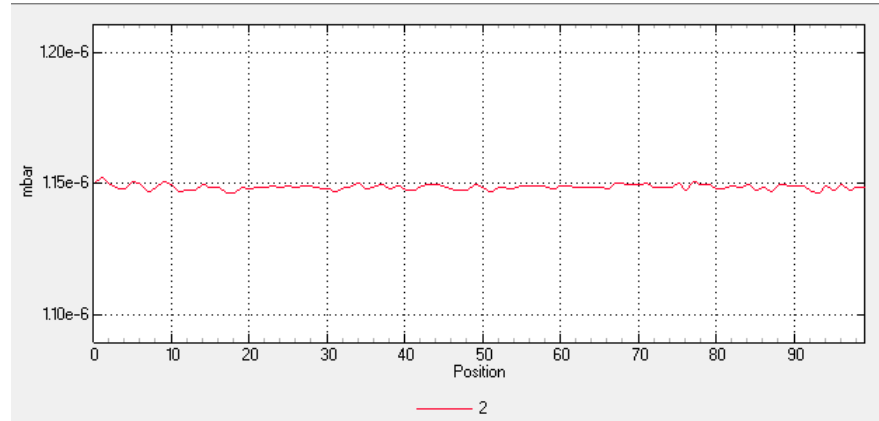


Figura 6.15. Perfil de pressió de la superfície 2

El perfil de pressió de la guia d'ona és constant, l'orifici de bombeig és molt petit, això fa que no hi hagi una diferencia de pressió considerable entre l'inici i el final d'aquesta. La pressió de la guia d'ona es mostra a la Taula 6.14.

Punts d'interès	Guia
<b>mbar</b>	$1,15 \times 10^{-6}$

Taula 6.14. Pressió superfície 2

Linac (3) (Figura 6.5 i Figura 6.6):

La Figura 6.16 mostra el perfil de pressió a l'interior del linac delimitat per les obertures que connecten amb la cambra de buit.

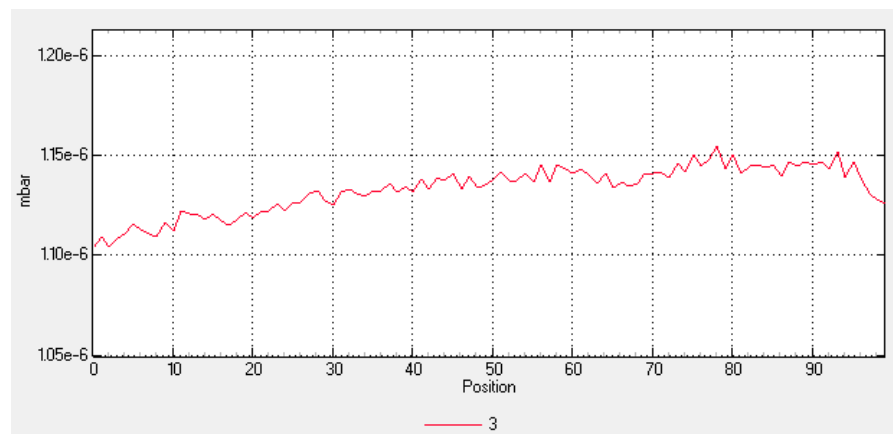


Figura 6.16. Perfil pressió superfície 3

En el linac si que s'observa una conductància entre el començament i el punt de màxima pressió, que coincideix amb l'orifici que connecta amb la guia d'ona. Aquest valor de pressió és el que es mostra a la Taula 6.15).

Punts d'interès	Màx. linac
<b>mbar</b>	$1,15 \times 10^{-6}$

Taula 6.15. Pressió superfície 3

Imant-Cambra-Imant (4) (Figura 6.5 i Figura 6.6):

La Figura 6.17 mostra el perfil de pressió respecte la longitud de la superfície que va d'un imant a l'altre passant per la cambra de buit.

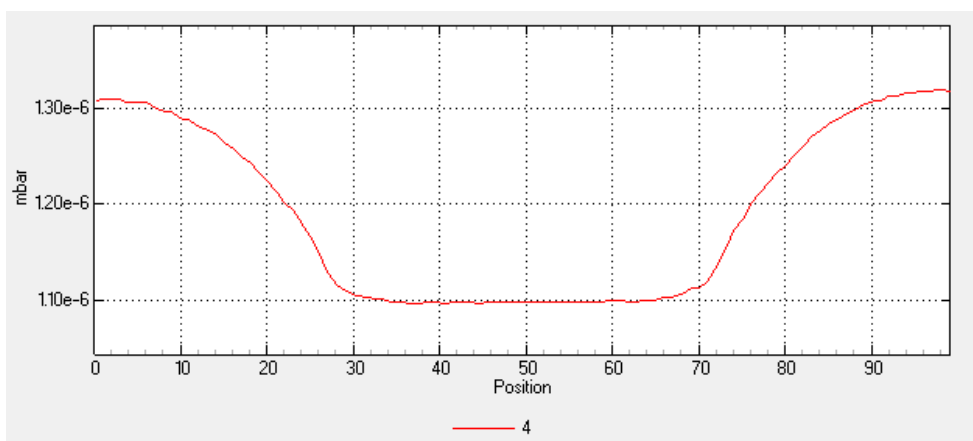


Figura 6.17. Perfil pressió superfície 3

En aquest perfil es veu clarament la conductància que hi ha des de l'interior dels imants fins a la cambra, hi ha un salt significatiu entre la pressió de la cambra del microtró i l'interior dels imants com es pot veure en la Taula 6.16.

Punts d'interès	Inici imant	Cambra
<b>mbar</b>	$1,33 \times 10^{-6}$	$1,09 \times 10^{-6}$

Taula 6.16. Pressions superfície 4

Imant-Cambra-Imant (5) (Figura 6.5 i Figura 6.6):

La Figura 6.18 mostra el perfil de pressió respecte la longitud de l'altra superfície que va d'un imant a l'altre passant per la cambra de buit

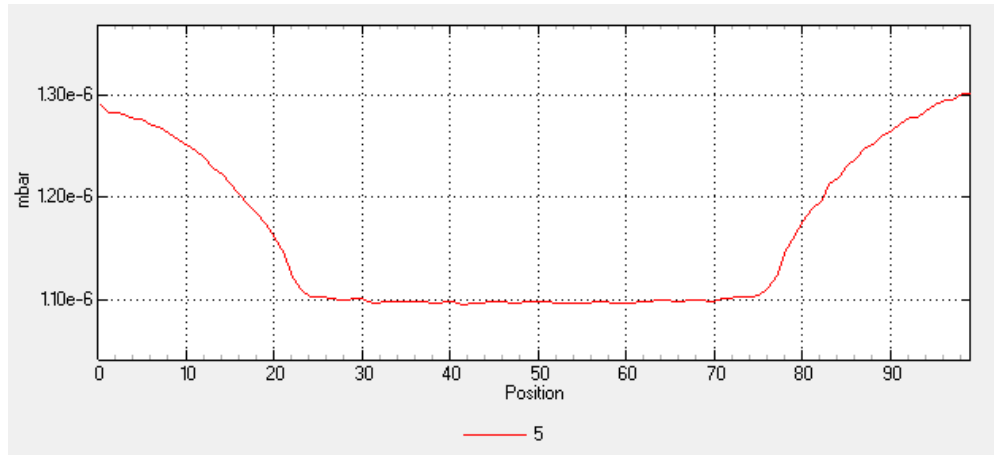


Figura 6.18. Perfil pressió superfície 5

El perfil és gairebé igual que el de la superfície 4, els valors de la pressió dels punts més característics són els mostrats en la Taula 6.17).

Punts d'interès	Inici imant	Cambra
<b>mbar</b>	$1,30 \times 10^{-6}$	$1,09 \times 10^{-6}$

Taula 6.17. Pressions superfície 5

Imant+Cambra+linac+cambra+imant (6) (Figura 6.19) (Figura 6.5 i Figura 6.6):

En la Figura 6.19 es mostra el perfil de pressió de la superfície que va d'imant a imant travessant el linac, els punts més característics d'aquesta superfície estan determinats en la Figura 6.4

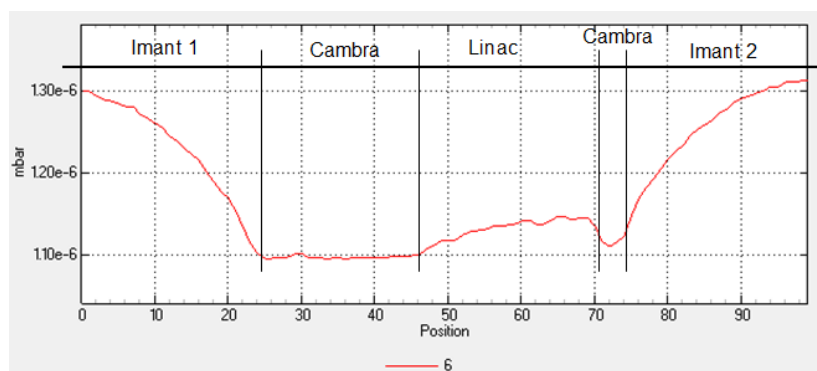


Figura 6.19. Perfil pressió superfície 6

En aquesta superfície es veu l'efecte de cada element de la geometria en el perfil de pressió, des de una pressió elevada a l'interior dels imants passant per la pressió més baixa a l'interior de cambra, els valors de les pressions en els punts més característics es mostren a la Taula 6.18.

Punts d'interès	Inici imant	Cambra	Màx. Linac
<b>mbar</b>	$1,30 \times 10^{-6}$	$1,09 \times 10^{-6}$	$1,15 \times 10^{-6}$

Taula 6.18. Pressions superfície 6

Cambra horitzontal (7) i Cambra vertical (8) (Figura 6.5 i Figura 6.6):

La Figura 6.20 mostra el perfil de pressió de les superfícies horitzontals i verticals de la cambra de buit.

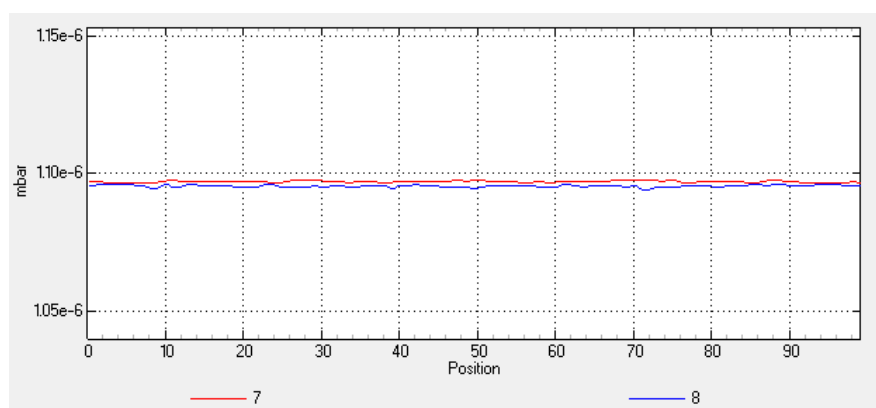


Figura 6.20.. Perfil pressió superfícies 7 i 8

La pressió a l'interior de cambra de buit es manté constant i val (Taula 6.19):

Punts d'interès	Cambra
<b>mbar</b>	$1,09 \times 10^{-6}$

Taula 6.19. Pressió superfícies 7 i 8

Per fer un estudi més a fons de la variació de pressió dintre del microtrò, s'han realitzat un total de 24 simulacions en les que s'ha variat l'outgassing de les REPM a raó 0,5, es a dir, el valor s'ha anat dividint per dos, i la velocitat de bombeig de la bomba iònica s'ha reduït una diferència de 25 l/s en cada simulació.



Quan es faci el buit real al microtró, les úniques dades de les que es disposarà amb total fiabilitat seran les pressions a la bomba i al sensor, la pressió del sensor de manera directa i la de la bomba de manera indirecta aplicant una conversió a la corrent que circula al seu interior.

Així doncs la intenció de les simulacions és que a partir de les mesures de pressió a la bomba i al sensor puguem determinar la pressió que hi haurà a l'interior dels imants, el lloc més crític.

## Resum de les simulacions

Tots els valors de les pressions estan en mbar (Taula 6.20, Taula 6.21, Taula 6.22 i Taula 6.23), en cada taula, les simulacions presenten un  $q_A$  diferent definit en el títol.

$S_{\text{Bomba}}$	Bomba	Sensor	Linac	Cambra	Imants
<b>150 l/s</b>	9,14E-07	1,06E-06	1,16E-06	1,10E-06	1,33E-06
<b>125 l/s</b>	1,09E-06	1,24E-06	1,32E-06	1,28E-06	1,51E-06
<b>100 l/s</b>	1,36E-06	1,51E-06	1,59E-06	1,55E-06	1,78E-06
<b>75 l/s</b>	1,80E-06	1,94E-06	2,07E-06	1,98E-06	2,22E-06
<b>50 l/s</b>	2,71E-06	2,85E-06	2,96E-06	2,89E-06	3,12E-06
<b>25 l/s</b>	5,37E-06	5,52E-06	5,62E-06	5,56E-06	5,80E-06

Taula 6.20.  $q_A$  (REPM) =  $1,57 \times 10^{-7} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$

$S_{\text{Bomba}}$	Bomba	Sensor	Linac	Cambra	Imants
<b>150 l/s</b>	4,57E-07	5,29E-07	5,77E-07	5,50E-07	6,56E-07
<b>125 l/s</b>	5,47E-07	6,17E-07	6,66E-07	6,39E-07	7,51E-07
<b>100 l/s</b>	6,82E-07	7,53E-07	7,98E-07	7,74E-07	8,89E-07
<b>75 l/s</b>	9,02E-07	9,74E-07	1,03E-06	9,97E-07	1,11E-06
<b>50 l/s</b>	1,36E-06	1,43E-06	1,48E-06	1,45E-06	1,57E-06
<b>25 l/s</b>	2,69E-06	2,76E-06	2,86E-06	2,78E-06	2,89E-06

Taula 6.21.  $q_A$  (REPM) =  $7,85 \times 10^{-8} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$

$S_{\text{Bomba}}$	Bomba	Sensor	Linac	Cambra	Imants
<b>150 l/s</b>	2,29E-07	2,65E-07	2,90E-07	2,76E-07	3,32E-07
<b>125 l/s</b>	2,74E-07	3,10E-07	3,35E-07	3,21E-07	3,77E-07
<b>100 l/s</b>	3,42E-07	3,78E-07	4,07E-07	3,88E-07	4,46E-07
<b>75 l/s</b>	4,53E-07	4,89E-07	5,16E-07	4,98E-07	5,57E-07
<b>50 l/s</b>	6,80E-07	7,16E-07	7,38E-07	7,26E-07	7,84E-07
<b>25 l/s</b>	1,35E-06	1,39E-06	1,42E-06	1,40E-06	1,46E-06

Taula 6.22.  $q_A$  (REPM) =  $3,93 \times 10^{-8} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$

$S_{\text{Bomba}}$	Bomba	Sensor	Linac	Cambra	Imants
<b>150 l/s</b>	1,15E-07	1,33E-07	1,45E-07	1,38E-07	1,66E-07
<b>125 l/s</b>	1,37E-07	1,55E-07	1,67E-07	1,60E-07	1,89E-07
<b>100 l/s</b>	1,71E-07	1,89E-07	2,01E-07	1,95E-07	2,23E-07
<b>75 l/s</b>	2,27E-07	2,45E-07	2,60E-07	2,51E-07	2,80E-07
<b>50 l/s</b>	3,40E-07	3,58E-07	3,71E-07	3,62E-07	3,92E-07
<b>25 l/s</b>	6,76E-07	6,94E-07	7,10E-07	6,99E-07	7,29E-07

Taula 6.23.  $q_A$  (REPM) =  $1,96 \times 10^{-8} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$

A continuació es procedirà a fer un anàlisi dels resultats per poder extreure'n conclusions, i determinar unes equacions que descriguin el comportament del buit al microtró de la UPC. Amb les dades obtingudes podem calcular el valor de les variacions de pressió, entre la bomba i el sensor, i entre el sensor i l'imant. Es vol veure la relació que hi ha entre cada salt de pressió d'aquests punts en funció de la velocitat de bombeig que i de l'outgassing específic de les terres rares. La Taula 6.24 i la Taula 6.25 mostren aquests salts de pressió en mil·libars.

qA (REPM)	$1,57 \times 10^{-7} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$		$7,85 \times 10^{-8} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$	
<b>S<sub>bomba</sub></b>	$\Delta P(\text{Sensor-Bomba})$	$\Delta P(\text{Imant-Sensor})$	$\Delta P(\text{Sensor-Bomba})$	$\Delta P(\text{Imant-Sensor})$
<b>150 l/s</b>	1,43E-07	2,70E-07	7,20E-08	1,27E-07
<b>125 l/s</b>	1,50E-07	2,70E-07	7,00E-08	1,34E-07
<b>100 l/s</b>	1,50E-07	2,70E-07	7,10E-08	1,36E-07
<b>75 l/s</b>	1,40E-07	2,80E-07	7,20E-08	1,36E-07
<b>50 l/s</b>	1,40E-07	2,70E-07	7,00E-08	1,40E-07
<b>25 l/s</b>	1,50E-07	2,80E-07	7,00E-08	1,30E-07

Taula 6.24.  $\Delta P(\text{Sensor-Bomba})$  i  $\Delta P(\text{Imant-Sensor})(1)$ 

qA (REPM)	$3,93 \times 10^{-8} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$		$1,96 \times 10^{-8} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$	
<b>S<sub>bomba</sub></b>	$\Delta P(\text{Sensor-Bomba})$	$\Delta P(\text{Imant-Sensor})$	$\Delta P(\text{Sensor-Bomba})$	$\Delta P(\text{Imant-Sensor})$
<b>150 l/s</b>	3,60E-08	6,70E-08	3,60E-08	6,70E-08
<b>125 l/s</b>	3,60E-08	6,70E-08	3,60E-08	6,70E-08
<b>100 l/s</b>	3,60E-08	6,80E-08	3,60E-08	6,80E-08
<b>75 l/s</b>	3,60E-08	6,80E-08	3,60E-08	6,80E-08
<b>50 l/s</b>	3,60E-08	6,80E-08	1,80E-08	3,40E-08
<b>25 l/s</b>	4,00E-08	7,00E-08	1,80E-08	3,50E-08

Taula 6.25.  $\Delta P(\text{Sensor-Bomba})$  i  $\Delta P(\text{Imant-Sensor})(2)$ 

Amb les dades de la Taula 6.20, Taula 6.21, Taula 6.22, Taula 6.23, Taula 6.24 i Taula 6.25, podem dir que la pressió en algun punt d'interès del microtró dependrà de la velocitat de bombeig, però la diferència de pressions entre dos punts només dependrà de la conductància i la càrrega de gas total. Aquesta afirmació també està corroborada per l'equació 5. Amb aquesta premissa avalada per les dades obtingudes es procedirà a fer un estudi per poder predir la pressió en punts importants del microtró.

Aquestes dades s'analitzen mitjançant un gràfic de dispersió, i s'extreu una tendència (Figura 6.21).

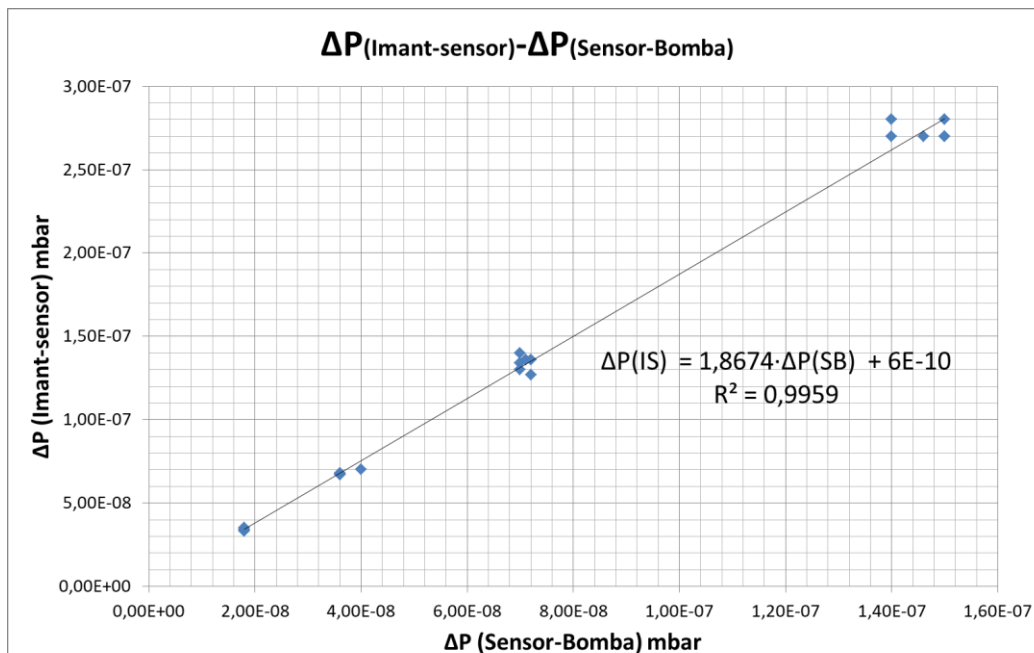


Figura 6.21. Gràfic de  $\Delta P(\text{IS})$  en funció de  $\Delta P(\text{SB})$

Es pot comprovar com la diferència de pressió entre la bomba i el sensor i entre el sensor i l'imat no està condicionada per la velocitat de bombeig del sistema, depèn de la  $q_A$  de les REPM com es pot veure en la Figura 6.21 on es mostra l'equació resultant que relaciona aquestes variacions de pressió. Si eliminem el terme que es de varis ordres de magnitud inferior ens queda:

$$\Delta P(\text{IS}) = 1,867 \cdot \Delta P(\text{SB}) \quad (\text{Eq. 12})$$

Obtenint que la pressió final als imants segueix la equació:

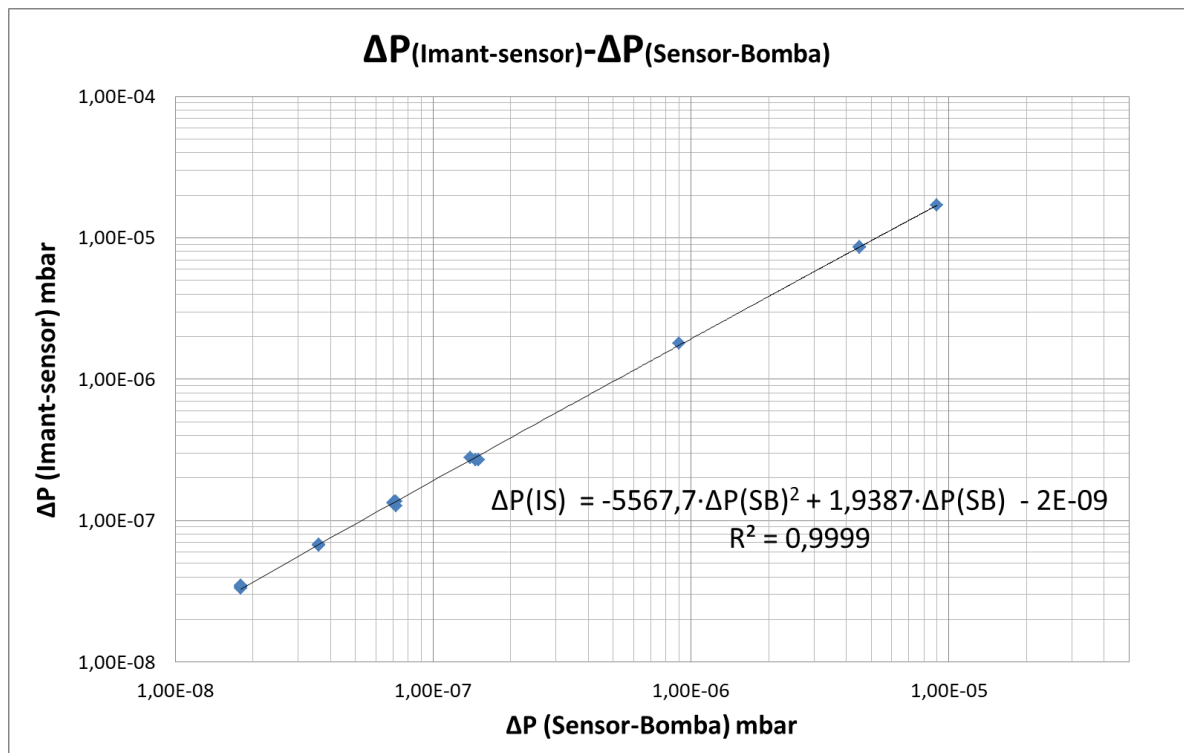
$$P_{\text{imants}} = P_{\text{sensor}} + \Delta P(\text{IS}) \quad (\text{Eq. 13})$$

Tenint en compte aquesta equació es simulen amb Molflow+ 4 casos més amb diferents  $q_A$  ( $\text{mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) i diferents velocitats de bombeig per veure si les equacions es compleixen. Els resultats es mostren en la Taula 6.26.

$q_A$	$P_{bomba}$	$P_{sensor}$	$P_{imant}$	$\Delta P(SB)$	$\Delta P(IS)$	$\Delta P(IS)$ eq. 8	$P_{imant}$ eq. 9
1E-5	1,15E-04	1,24E-04	1,41E-04	9,00E-06	1,70E-05	1,68E-05	1,41E-04
1E-6	1,15E-05	1,24E-05	1,42E-05	9,00E-07	1,80E-06	1,68E-06	1,41E-05
5E-6	2,90E-05	3,35E-05	4,22E-05	4,50E-06	8,70E-06	8,41E-06	4,19E-05
5E-6	4,33E-05	4,78E-05	5,63E-05	4,50E-06	8,50E-06	8,33E-06	5,61E-05

Taula 6.26. Simulacions  $\Delta P(SB) - \Delta P(IS)$ 

Les equacions aproximen amb precisió la pressió final que hi haurà als imants, amb aquestes quatre noves simulacions es millora l'equació 12 per tenir més precisió alhora de calcular la pressió final als imants amb l'equació 13 (Figura 6.22).

Figura 6.22. Gràfic de  $\Delta P(IS)$  en funció de  $\Delta P(SB)$  modificat

Finalment l'equació que determina la diferència de pressió entre el sensor i l'imant, en funció de la diferència de pressió entre sensor i la bomba trobada amb la Figura 6.22 i ometent els termes de varis ordres de magnitud inferiors, queda així:

$$\Delta P(IS) = 1,93 \cdot \Delta P(SB) \quad (\text{Eq. 14})$$

Sabent que les diferències de pressió  $\Delta P(SB)$  i  $\Delta P(IS)$  depenen del ràtio d'outgassing superficial,  $q_A$ , i no de la velocitat de bombeig, es provarà de determinar una equació que relacioni  $\Delta P(SB)$  amb  $q_A$ . També es tenen en compte les simulacions de la Taula 6.26 a l'hora de determinar aquesta relació (Figura 6.23).

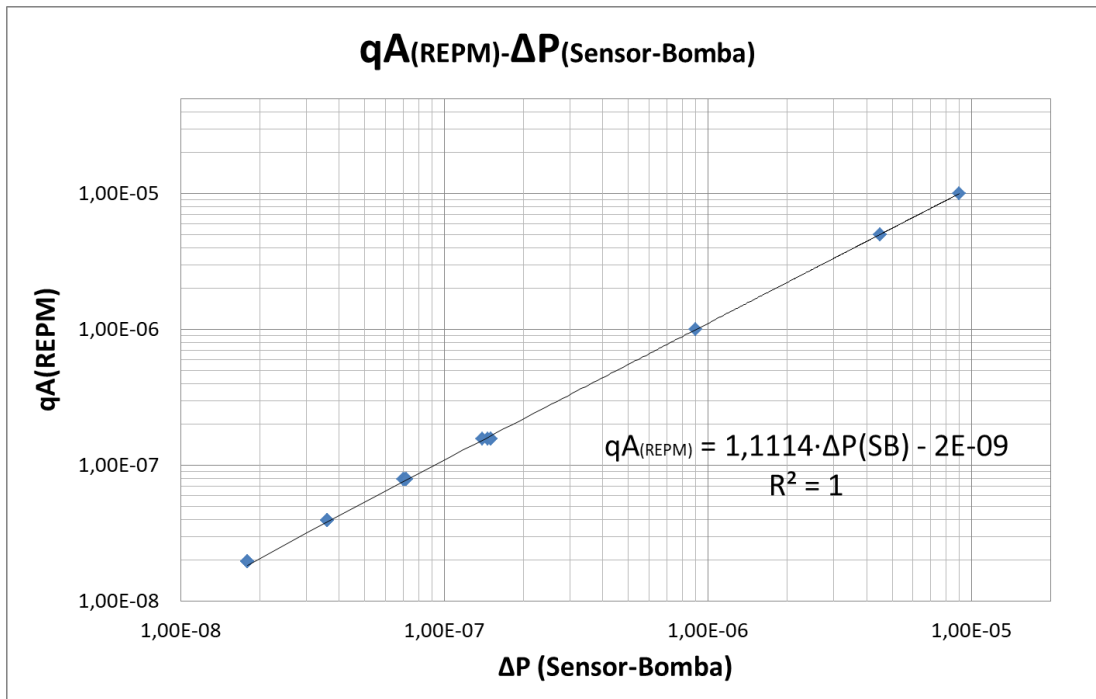


Figura 6.23. Gràfic de  $q_A$  en funció de  $\Delta P(SB)$

L'equació que s'obté de la Figura 6.23, eliminant els termes de varis ordres de magnitud inferiors queda:

$$q_A = 1,11 \cdot \Delta P(SB) \quad (\text{Eq. 15})$$

Aïllant  $\Delta P(SB)$  tenim:

$$\Delta P(SB) = \frac{q_A}{1,1114} \quad (\text{Eq. 16})$$

Finalment per obtenir el valor de la pressió als imants en funció de la pressió al sensor i de  $q_A$  tenim l'expressió següent::

$$P_{\text{imants}} = P_{\text{sensor}} + 1,75 \cdot q_A \quad (\text{Eq. 17})$$

### 6.2.2. Comparació resultats amb estudis previs

Amb les equacions obtingudes en les simulacions es vol comparar els resultats obtinguts en estudis previs, el resultat d'aquelles simulacions era:

*“Les pressions mitjanes als imants, a l'estructura d'acceleració i al sensor són de  $2,72 \cdot 10^{-7}$ ,  $2,71 \cdot 10^{-7}$  i  $2,67 \cdot 10^{-7}$  Pa, respectivament, quan la velocitat de bombeig és nominal de 0,065 m<sup>3</sup>/s i la desorció és de  $1 \cdot 10^{-9}$  Pa·m<sup>3</sup>/s·m<sup>2</sup>.” [12]*

Aquestes dades equivalen a les de la Taula 6.28 i fent una simulació amb Molflow+ amb aquestes dades i aplicant les equacions 15 i 17 s'obtenen els valors de la Taula 6.27:

<b>P<sub>sensor</sub></b>	$2,67 \cdot 10^{-9}$ mbar
<b>P<sub>imant</sub></b>	$2,72 \cdot 10^{-9}$ mbar
<b>S<sub>bomba</sub></b>	65 l/s
<b>q<sub>A</sub></b>	$1 \cdot 10^{-12}$ mbar·l/s·cm <sup>2</sup>

Taula 6.27. Resultats simulació previa [12]

<b>P<sub>sensor</sub></b>	$3,22 \cdot 10^{-10}$ mbar
<b>P<sub>imant</sub></b>	$3,29 \cdot 10^{-10}$ mbar
<b>P<sub>bomba</sub></b>	$3,03 \cdot 10^{-10}$ mbar
<b>P<sub>imant equació17</sub></b>	$5,64 \cdot 10^{-9}$ mbar
<b>S<sub>bomba</sub></b>	65 l/s
<b>q<sub>A equació15</sub></b>	$1,02 \cdot 10^{-9}$ mbar·l/s·cm <sup>2</sup>

Taula 6.28. Resultats simulació i equacions

Les simulacions prèvies no tenien en compte un outgassing diferent entre les terres rares i l'acer. Tant l'acer com els imants tenien un  $q_A$  igual. És per això que els dos models no són compatibles entre si.

Tot i això la simulació en Molflow+, aplicant les condicions amb que s'havien fet les simulacions prèvies haurien de ser molt semblants, doncs la geometria del microtró no ha patit canvis molt significatius. Com es pot veure en la Taula 6.27 i en la Taula 6.28, els resultats de la pressió al sensor,  $P_{\text{sensor}}$ , i a l'imant,  $P_{\text{imant}}$ , obtinguts de la simulació no coincideixen.

Les equacions que permetien trobar les pressions desitjades eren:

*“La pressió,  $p$  (Pa), varia en funció de la velocitat de bombeig,  $S$  ( $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ ), segons:  $p = 3 \cdot 10^{-5} \cdot S^2 - 7 \cdot 10^{-6} \cdot S + 6 \cdot 10^{-7}$  pels imants i l'estructura d'acceleració, i segons  $p = 2 \cdot 10^{-5} \cdot S^2 - 7 \cdot 10^{-6} \cdot S + 6 \cdot 10^{-7}$  pel sensor.” [12]*

Aquesta afirmació tampoc concorda amb els resultats obtinguts, ja que quan es tenen desorcions diferents, la pressió varia en funció d'aquesta i de la velocitat de bombeig. Es a dir, no es pot determinar la pressió del sistema només amb la  $S$ , també es necessita un  $q_A$ .

I finalment la conclusió a la que s'arribava era:

*“Pels valors de desorció estudiats, el microtró assoliria el rang de pressions que comprèn el nivell l'ultra-buit. Pel cas més complet estudiat, que correspon als valors de màxim nivell de pressió, aquests estan al voltant de  $2 \cdot 10^{-7}$  Pa.” [12]*

Amb els nous casos d'outgassing estudiats en aquest treball, el microtró arribarà a un nivell de pressió que comprendrà entre el HV (alt buit) i el VHV (buit molt alt), però no assolirà nivells d'UHV (ultra alt buit).

Pel cas complet estudiat, amb un  $q_A$  de  $1,57 \cdot 10^{-7}$  mbar·l·s<sup>-1</sup>·cm<sup>-2</sup>, la pressió màxima és de l'ordre de  $10^{-6}$  mbar ( $10^{-4}$  Pa), pressió molt superior a la obtinguda en les simulacions prèvies, que amb un  $q_A$  de  $1 \cdot 10^{-12}$  mbar·l·s<sup>-1</sup>·cm<sup>-2</sup>, el valor de la pressió màxima era de l'ordre de  $10^{-9}$  mbar ( $10^{-7}$  Pa).

### 6.2.3. Conductància del sistema

La conductància del tub de bombeig no es pot determinar amb les fórmules analítiques ja que no tenim un cas de tub senzill, el tub té una guia d'ona a l'interior.

Es determina doncs una conductància hipotètica, doncs s'ha explicat en el punt 4.2.4 (Conductància pàg.16), que en nivells d'alt buit i de buit molt alt, la conductància no depen de la variació de pressió, sinó únicament del gas, de la temperatura i de la geometria.

Aquesta conductància serà la que hi ha des de la bomba fins la cambra. A partir de les dades simulades (Figura 6.14 i Taula 6.13) i aplicant l'equació 7, podrem determinar-ne un valor numèric.

L'àrea d'outgassing,  $A_d$ , dels imants és de 849,08 cm<sup>2</sup>, el  $q_A$  és de  $1,57 \cdot 10^{-7}$  mbar·l·s<sup>-1</sup>·cm<sup>2</sup>, el gas provinent de l'acer es negligible i la  $Q_A$  total del sistema és de  $1,33 \cdot 10^{-4}$  mbar·l·s<sup>-1</sup>.

Així doncs la conductància del tub de bombeig,  $C_{tub}$ , és de 758,44 l/s.



#### 6.2.4. Límits de càrrega de gas al sistema de buit

Com s'ha presentat anteriorment en el punt 4.4 (Microtró de la UPC pàg.22), en el disseny del microtró de la UPC està determinada la següent especificació:

- ✓ El sistema de buit ha de subministrar un bombeig al microtró que permeti assolir un nivell de buit inferior a  $5 \cdot 10^{-6}$  mbar a la zona crítica, l'interior dels imants.

Així doncs, sabent que la mida dels imants serà la mateixa, la càrrega de gas màxima que podem tenir al sistema dependrà de la velocitat de bombeig de la bomba S. A partir de les dades que obtenim de la Taula 6.20, la Taula 6.21, la Taula 6.22 i la Taula 6.23, podem graficar per cada S les pressions que tindrem als imants en funció de  $q_A$ .

Cada una de les velocitats de bombeig té associats 4 valors de pressió als imants, un per cada  $q_A$  que s'ha estudiat (Figura 6.24).

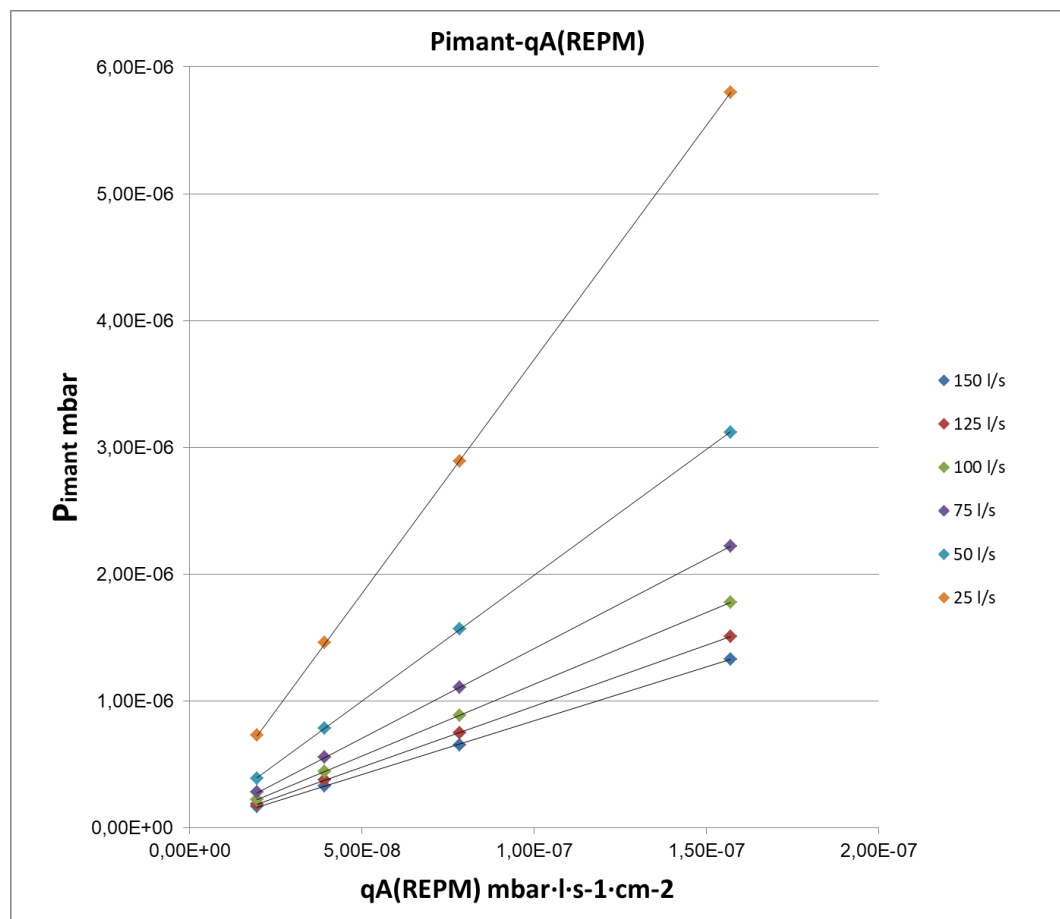


Figura 6.24. Gràfic de  $P_{\text{imant}}$  en funció de  $q_A$  per cada S.

Podem obtenir doncs, per cada velocitat de bombeig, una expressió que relaciona la pressió a l'imant amb el  $q_A$  de les REPM.

Per  $S=150$  l/s ( $R^2=0,9999$ ):

$$P_{imant} = 8,47 \cdot q_A - 2 \cdot 10^{-9} \quad (Eq.18)$$

Per  $S=125$  l/s ( $R^2=1$ ):

$$P_{imant} = 9,61 \cdot q_A - 10^{-9} \quad (Eq.19)$$

Per  $S=100$  l/s ( $R^2=1$ ):

$$P_{imant} = 11,33 \cdot q_A + 5 \cdot 10^{-10} \quad (Eq.20)$$

Per  $S=75$  l/s ( $R^2=1$ ):

$$P_{imant} = 14,12 \cdot q_A + 2 \cdot 10^{-9} \quad (Eq.21)$$

Per  $S=50$  l/s ( $R^2=1$ ):

$$P_{imant} = 19,85 \cdot q_A + 5 \cdot 10^{-9} \quad (Eq.22)$$

Per  $S=25$  l/s ( $R^2=1$ ):

$$P_{imant} = 36,89 \cdot q_A + 5 \cdot 10^{-9} \quad (Eq.23)$$

Aquestes equacions ens permetran trobar la  $q_A$  màxima que podem tenir per cada interval de velocitat de bombeig, la  $q_A$  màxima serà tal que la pressió dels imants no superi els  $5 \cdot 10^{-6}$  mbar.

La Taula 6.29 mostra les relacions entre els outgassings específics i les pressions als imants,  $P_{imant}$ , obtingudes amb les equacions anteriors. També mostra la pressió que tindrem al sensor,  $P_{sensor}$ , aplicant la equació 17. S'han marcat les franges límit que entren dintre de les especificacions.

150 l/s Eq.18			125 l/s Eq.19			100 l/s Eq.20		
$q_A$	$P_{imant}$	$P_{sensor}$	$q_A$	$P_{imant}$	$P_{sensor}$	$q_A$	$P_{imant}$	$P_{sensor}$
1,96E-08	1,64E-07	1,35E-07	1,96E-08	1,87E-07	1,59E-07	1,96E-08	2,23E-07	1,94E-07
3,92E-08	3,30E-07	2,67E-07	3,92E-08	3,76E-07	3,13E-07	3,92E-08	4,45E-07	3,82E-07
7,84E-08	6,62E-07	5,31E-07	7,84E-08	7,53E-07	6,22E-07	7,84E-08	8,89E-07	7,58E-07
1,57E-07	1,33E-06	1,06E-06	1,57E-07	1,51E-06	1,24E-06	1,57E-07	1,78E-06	1,51E-06
3,14E-07	2,65E-06	2,11E-06	3,14E-07	3,01E-06	2,47E-06	3,14E-07	3,55E-06	3,01E-06
5,91E-07	5,00E-06	3,98E-06	5,20E-07	5,00E-06	4,10E-06	4,41E-07	5,00E-06	4,24E-06
6,27E-07	5,31E-06	4,22E-06	6,27E-07	6,03E-06	4,94E-06	6,27E-07	7,11E-06	6,02E-06
1,25E-06	1,06E-05	8,45E-06	1,25E-06	1,21E-05	9,89E-06	1,25E-06	1,42E-05	1,20E-05
2,51E-06	2,12E-05	1,69E-05	2,51E-06	2,41E-05	1,98E-05	2,51E-06	2,84E-05	2,41E-05
5,02E-06	4,25E-05	3,39E-05	5,02E-06	4,83E-05	3,96E-05	5,02E-06	5,69E-05	4,82E-05
75 l/s Eq.21			50 l/s Eq.22			25 l/s Eq.23		
$q_A$	$P_{imant}$	$P_{sensor}$	$q_A$	$P_{imant}$	$P_{sensor}$	$q_A$	$P_{imant}$	$P_{sensor}$
1,96E-08	2,79E-07	2,50E-07	1,96E-08	3,94E-07	3,65E-07	1,96E-08	7,28E-07	6,99E-07
3,92E-08	5,56E-07	4,93E-07	3,92E-08	7,83E-07	7,20E-07	3,92E-08	1,45E-06	1,39E-06
7,84E-08	1,11E-06	9,78E-07	7,84E-08	1,56E-06	1,43E-06	7,84E-08	2,90E-06	2,77E-06
1,57E-07	2,22E-06	1,95E-06	1,57E-07	3,12E-06	2,85E-06	1,35E-07	5,00E-06	4,77E-06
3,14E-07	4,43E-06	3,89E-06	2,52E-07	5,00E-06	4,57E-06	1,57E-07	5,79E-06	5,52E-06
3,54E-07	5,00E-06	4,39E-06	3,14E-07	6,23E-06	5,69E-06	3,14E-07	1,16E-05	1,10E-05
6,27E-07	8,86E-06	7,77E-06	6,27E-07	1,25E-05	1,14E-05	6,27E-07	2,31E-05	2,21E-05
1,25E-06	1,77E-05	1,55E-05	1,25E-06	2,49E-05	2,27E-05	1,25E-06	4,63E-05	4,41E-05
2,51E-06	3,54E-05	3,11E-05	2,51E-06	4,98E-05	4,55E-05	2,51E-06	9,26E-05	8,82E-05
5,02E-06	7,09E-05	6,22E-05	5,02E-06	9,96E-05	9,10E-05	5,02E-06	1,85E-04	1,76E-04

Taula 6.29. Outgassing, pressió imant i pressió sensor.

Aquestes dades ens permetran obtenir una relació entre el  $q_A$  i la S. Com es d'esperar al disminuir la velocitat de bombeig, el valor límit de  $q_A$  augmentarà. La pressió al sensor,  $P_{sensor}$ , és més propera a la pressió límit dels imants,  $P_{imant}$ , a mesura que disminueix la S.

### 6.2.5. Requeriments del bombeig

Com s'ha vist en l'apartat previ, la velocitat mínima de bombeig necessària per tal que la pressió als imants sigui inferior a  $5 \cdot 10^{-6}$  mbar depèn del  $q_A$  de les REPM. Graficant els resultats de la Taula 6.29 obtenim la Figura 6.25.

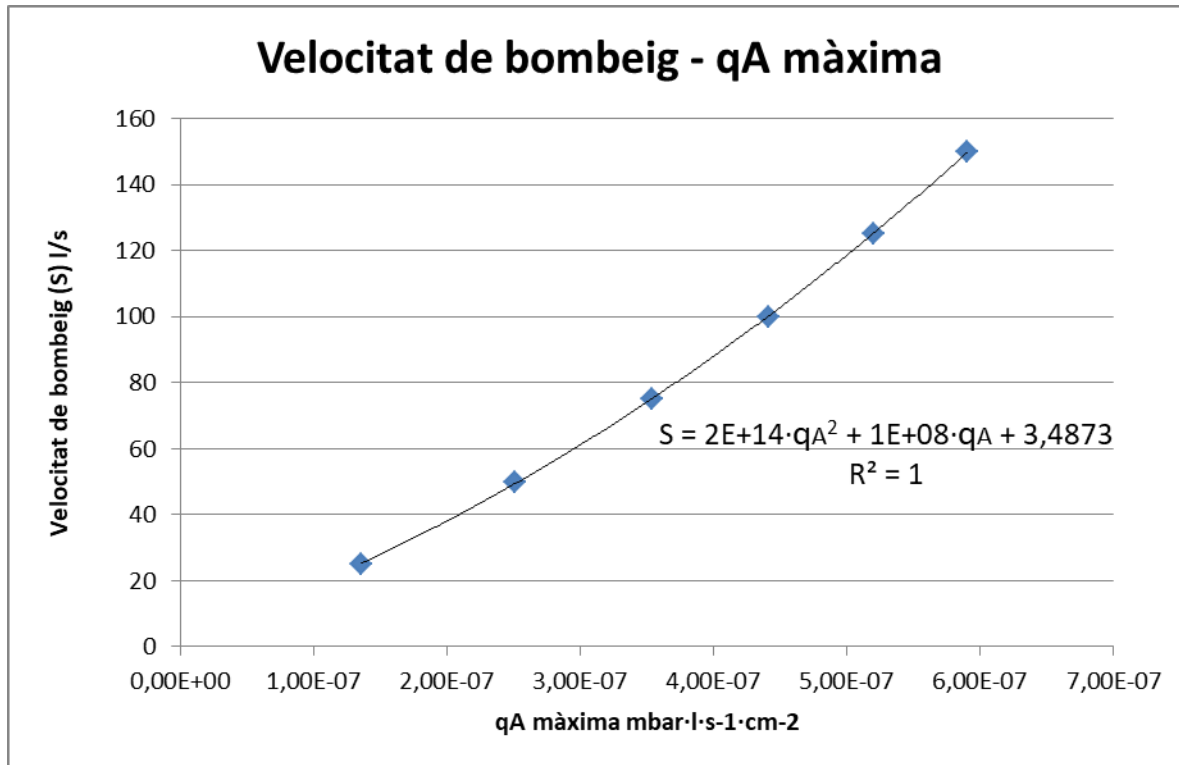


Figura 6.25. Gràfic de S en funció de  $q_A$ .

La corba d'interpolació d'aquestes dades ens donarà l'expressió:

$$S_{\text{limit}} = 2 \cdot 10^{14} \cdot q_A^2 + 1 \cdot 10^8 \cdot q_A + 3,4873 \quad (\text{Eq.24})$$

Aquesta equació ens diu quin es el bombeig mínim que necessitem amb un determinat  $q_A$  per tal que a l'interior dels imants la pressió no sigui superior a  $5 \cdot 10^{-6}$  mbar. Es a dir, d'aquesta manera podrem determinar la velocitat de bombeig mínima necessària per complir les especificacions del buit a partir del valor de l'outgassing de les REPM.

## 7. Planificació temporal

El treball s'ha dividit en dues parts pel que fa la planificació temporal, una primera part on s'han adquirit coneixements del buit i de Molflow+ per poder començar a realitzar les simulacions de casos senzills. Aquestes simulacions s'han comparat amb les fórmules analítiques i s'ha buscat una possible correlació. També s'ha llegit el TFM de l'estudi previ de les simulacions realitzades per detectar possibles errors i veure quins punts es podien millorar.

En la segona part s'ha fet l'estudi amb profunditat del microtró de la UPC, s'han realitzat simulacions del model final i s'han analitzat i comparat els resultats per finalment poder determinar unes conclusions i determinar unes equacions que descriguin el comportament del buit del microtró.

El diagrama de Gantt de la Figura 7.1 mostra la planificació i el desenvolupament de les tasques realitzades durant la confecció del treball de fi de grau.

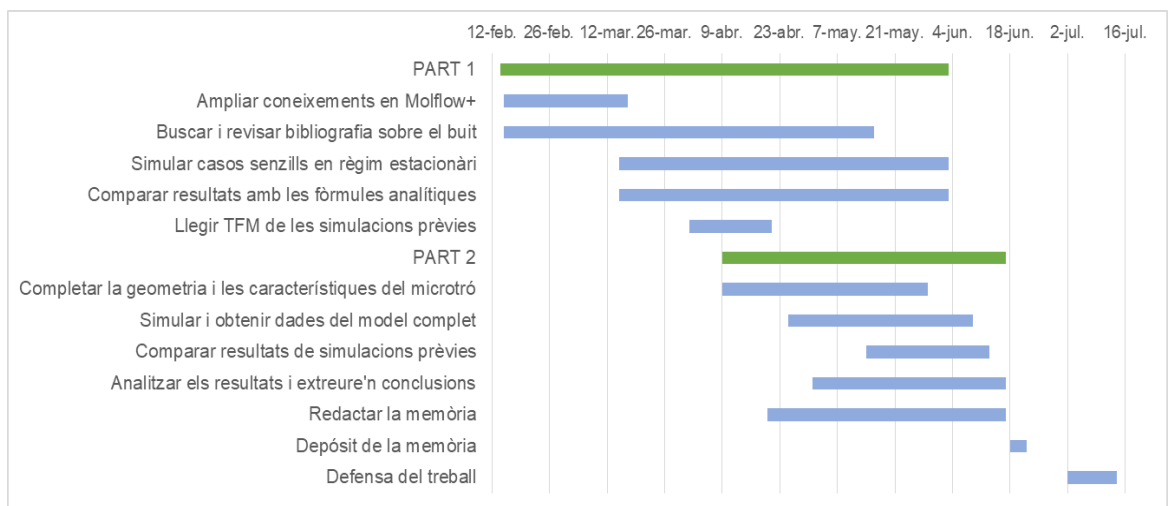


Figura 7.1. Diagrama de Gantt, planificació treball fi de grau

## 8. Pressupost

La finalitat del projecte es realitzar unes simulacions i analitzar-les, en cap cas es pretén modificar la configuració actual del microtró. El pressupost doncs serà un desglossament dels costos en recursos humans, materials i despeses associades a les simulacions. El pressupost està estructurat en dues parts:

La primera part són els costos en concepte de recursos humans, els honoraris com a enginyer júnior són de 15 €/hora. En la segona part entrarien els costos en concepte de materials i subministres, es considera que la duració del projecte ha estat de quatre mesos, així doncs es té en compte el lloguer de l'oficina, les despeses i el condicionament durant aquest temps. Finalment també s'inclouen els costos del material que s'ha utilitzat. La llicència de SolidWorks anual costa 6000€, al pressupost s'afegeix la part proporcional. Molflow+ és un programari lliure i gratuït. L'ordinador utilitzat ha costat 1800€, la vida útil és de 4 anys, s'afegeix l'amortització que ha tingut en aquests 4 mesos.

La Taula 8.1 mostra el pressupost desglossat, amb l'aplicació de costos d'imprevistos i el benefici industrial.

<i>Concepte en recursos humans</i>	Temps [h]	Preu [€/h]	Total [€]
Fonaments bàsics en "buit"	20	15	300 €
Formació tècnica Molflow+	20	15	300 €
Simulacions i obtenció de dades	200	15	3.000 €
Anàlisis de resultats	90	15	1.350 €
Memòria	60	15	900 €
<b>TOTAL</b>	<b>390</b>		<b>5.850 €</b>
<i>Concepte en materials i subministres</i>			
Lloguer oficina			1.500 €
Amortització ordinador de sobretaula			150 €
Material d'oficina i fungibles			120 €
Llicència SolidWorks (4 mesos)			2.000 €
Llum, aigua i climatització			300 €
Internet			200 €
<b>TOTAL</b>			<b>4.270 €</b>
<i>Pressupost total</i>			
Recursos humans			5.850 €
Materials i subministres			4.270 €
Costos generals (+10%)			1.012 €
Benefici industrial (+6%)			700 €
TOTAL SENSE IVA			11.832 €
+21% IVA			2.485 €
<b>TOTAL</b>			<b>14.317 €</b>

Taula 8.1. Pressupost del projecte

El preu final de la realització del projecte és de 14.317 € (IVA inclòs).

## 9. Impacte medi ambiental

El principal impacte medi ambiental que té la realització d'aquest projecte és l'emissió de CO<sub>2</sub> degut al consum elèctric.

La Taula 9.1 mostra el consum en kWh d'energia elèctrica degut al condicionament de l'oficina de 30 m<sup>2</sup>, l'ús de l'ordinador i finalment el consum d'aigua.

	Superfície m <sup>2</sup>	Consum anual <sup>1</sup> kWh/m <sup>2</sup>	Consum anual kWh	Consum projecte kWh
Calefacció Oficina	30	135	4050	1350
Electricitat oficina	30	52,5	1575	525
	Potència kW	Hores		
Ordinador	0,5	350		175
<b>TOTAL kWh</b>			<b>2050</b>	
	Superfície m <sup>2</sup>	Consum anual <sup>1</sup> litres/m <sup>2</sup>	Consum anual litres	Consum projecte litres
Aigua	30	165	4950	1650

Taula 9.1. Consum elèctric i d'aigua durant la realització del projecte

Una altra part d'aquest impacte és el degut al consum de paper, imprimir la memòria i documents durant la realització del treball genera una emissió de CO<sub>2</sub>. A la Taula 9.2 es mostra la quantitat total de paper utilitzat.

	Quantitat	m <sup>2</sup> /u.	kg/m <sup>2</sup>	TOTAL kg
Paper comú	100	0,062	0,07	<b>0,434</b>
Paper reciclat	200	0,062	0,03	<b>0,372</b>

Taula 9.2. Quantitat de paper utilitzat durant la realització treball.

Finalment utilitzant un document que facilita el Govern d'Aragó per calcular les emissions totals en relació a consums elèctrics i d'altres factors s'obté la Taula 9.3

<sup>1</sup> Dades obtingudes d'Enectica, *Energía en edificios de Oficinas*.

	Consum projecte	Unitats de mesura física	Factor d'emissió (Kg de CO <sub>2</sub> eq/kWh)		Kg de CO <sub>2</sub> eq
Electricitat	2050	kWh	0,385	Kg de CO <sub>2</sub> eq/kWh	789,25
Producte	Consum projecte	Unitats de mesura física	Factor d'emissió (Kg CO <sub>2</sub> eq/u.)		Kg de CO <sub>2</sub> eq
Paper comú	0,434	Kg	3	Kg de CO <sub>2</sub> eq/Kg de paper comú	1,30
Paper reciclat	0,372	Kg	1,8	Kg de CO <sub>2</sub> eq/Kg de paper reciclat	0,67
Aigua	1,650	m <sup>3</sup>	0,788	Kg de CO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup> d'aigua	1,30
<b>Total</b>					<b>792,52</b>

*Taula 9.3. Emissions totals de CO<sub>2</sub> del projecte.*

L'equivalent en kg de CO<sub>2</sub> generats durant la realització del projecte és de 792,52 kg.

Si les simulacions realitzades s'haguessin dut a terme experimentalment, les emissions de CO<sub>2</sub> haurien sigut molt superiors, ja que el consum elèctric del sistema de buit del microtró és elevat. Per tant es pot dir que el projecte també ha ajudat a reduir l'impacte medi ambiental.



## Conclusions

Després de la realització del treball, a partir de les simulacions i l'anàlisi dels resultats podem afirmar que:

- ✓ Els resultats de la fórmula analítica  $P = \frac{Q_{total}}{S}$  per calcular la pressió a l'interior d'una cambra de buit buida on només hi ha parets envoltants, són idèntics als resultats simulats amb Molflow+.
- ✓ Les fórmules analítiques per calcular la conductància en tubs i orificis no donen resultats comparables amb els obtinguts amb Molflow+. L'origen de les discrepàncies és aparentment la diferència entre les condicions d'aplicació de les fórmules i el model emprat en les simulacions.
- ✓ S'ha determinat que el microtró de la UPC treballarà en un rang de buit entre el HV i el VHV (entre  $10^{-3}$  i  $10^{-9}$  mbar) però mai de UHV (inferior a  $10^{-9}$ ).
- ✓ Els resultats de les simulacions del treball de fi de màster de l'Anna Viladomiu no estan determinats amb unes condicions pròximes a la realitat, per tant no es poden fer servir per aproximar el perfil de pressió a l'interior del microtró.

Cal afegir que amb Molflow+ no es pot simular en règim transitori l'assoliment del buit des de la pressió atmosfèrica, per tant no s'ha plantejat fer càlcul del temps de bombeig. -

De manera quantitativa podem afirmar que:

- ✓ Les REPM són la font principal de gas al sistema de buit amb un valor de  $Q=1,33 \cdot 10^{-4}$  mbar·l·s<sup>-1</sup> i l'interior dels imants és la zona crítica on la pressió és més elevada amb un valor de  $P=1,33 \cdot 10^{-6}$  mbar, quan el  $q_A$  de les REPM val  $1,57 \cdot 10^{-7}$  mbar·l·s<sup>-1</sup>·cm<sup>-2</sup>
- ✓ L'outgassing de les REPM en mbar·l·s<sup>-1</sup>·cm<sup>-2</sup> es pot calcular a partir de la pressió a la bomba i al sensor, i val:  $q_A = 1,11 \cdot \Delta P(SB)$ , quan el sistema està en HV o VHV.
- ✓ La pressió final a l'interior dels imants en mbar es pot calcular a partir de la pressió a la bomba i al sensor segons la fórmula:  $P_{imants} = P_{sensor} + \Delta P(IS)$  on  $\Delta P(IS) = 1,94 \cdot \Delta P(SB)$ , quan el sistema està en HV o VHV. L'expressió final per calcular la pressió en mbar als imants és:  $P_{imants} = P_{sensor} + 1,75 \cdot q_A$  amb  $q_A$  en mbar·l·s<sup>-1</sup>·cm<sup>-2</sup>.

- ✓ La velocitat de bombeig mínima que necessita el sistema a partir de l'outgassing específic de les REPM en l/s és igual a  $S_{\text{límit}} = 2 \times 10^{14} \cdot q_A^2 + 10^8 \cdot q_A + 3,4873$ , quan el sistema està en HV o VHV. Aquesta velocitat de bombeig ens assegurarà una pressió màxima als imants inferior a  $5 \cdot 10^{-6}$  mbar.

En base a aquestes conclusions podem afirmar que s'han aconseguit els objectius plantejats en aquest treball.

Com a recomanació final, quan es vagi a realitzar el buit experimentalment al microtró estaria bé conèixer l'outgassing real que presenten les REPM en les condicions de l'experimentació, per poder acurar la precisió dels càlculs que es realitzaran a partir de les indicacions del sensor i la bomba. Per a tenir aquestes dades caldria realitzar mesures experimentals de l'outgassing dels imants permanents emprats en el microtró.

També s'haurà d'estudiar la viabilitat de realitzar un *bake-out* de la cambra de buit del microtró, procés que milloraria el nivell de buit assolible.

## Agraïments

A Xavier Escaler per l'interès que ha mostrat durant la realització del treball i l'ajuda alhora d'estructurar idees i analitzar resultats.

A Youri Koubychine per haver-me proposat la realització d'aquest treball i per tot el suport rebut durant la seva realització.

Finalment, a tots els que m'han ajudat durant els meus estudis i en realització del treball de fi de grau, especialment a la meva família.

# Bibliografia

## Referències bibliogràfiques

- [1] GEVORGYAN, ARTUR. CELLS. *Vacuum Technology for particle Accelerators*. Gener 2016
- [2] AL-DMOUR, ESHRAQ. CELLS. *The Vacuum Technology for Accelerators*. Abril 2012
- [3] JOHN F. O'HANLON. *A User's Guide to Vacuum Technology*. Copyright © 2003 John Wiley & Sons, Inc.
- [4] DANIELSON, PHIL. *Gas loads in vacuum systems*. Vacuum & Thinfilm, October 1998.
- [5] WIKIPEDIA. Bomba turbomolecular. [[https://es.wikipedia.org/wiki/Bomba\\_turbomolecular](https://es.wikipedia.org/wiki/Bomba_turbomolecular)] 14 setembre 2017.
- [6] ACOSTA, JOEL; CORBAT, AGUSTÍN. *Técnicas de vacío*. Universidad de Buenos Aires, Abril 2014
- [7] JOHN. *Pirani Gauge*. Instrumentation today, October 2011.
- [8] MEYER. *Measuring Pressure in a Vacuum System*. MEYER tool & MFG. INC. April 2011
- [9] WIKIPEDIA. *Microtron*. Juliol 2016. [<https://en.wikipedia.org/wiki/Microtron>]
- [10] CERN ACCELERATING SCIENCE. *Molflow+, a Monte-Carlo Simulator package developed at CERN*. [<http://test-molflow.web.cern.ch/content/about-molflow>].
- [11] UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID. *Método de Montecarlo*. [[https://www.uam.es/personal\\_pdi/ciencias/carlosp/html/pid/montecarlo.html](https://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/carlosp/html/pid/montecarlo.html)].
- [12] VILADOMIU, ANNA. *Simulació del nivell d'ultra-buit del Microtró de la UPC*. Gener 2017
- [13] G.VANDONI. *Mesures de degazage*. Octubre 2012, CERN
- [14] Christopher Stone. *SNS-Outgassing Report -BI - Dipole Magnet*. OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY.

[15] AGILENT TECHNOLOGIES. *Ion pumps-Vaclon Plus 75*. Maig de 2011.  
[<http://www.agilent.com/en-us/products/vacuum-technologies/high-vacuum-pumps/ion-pumps/vacion-plus-75>].

[16] AGILENT TECHNOLOGIES. *Agilent Mini-TASK AG81*. 15 de juliol, 2011.  
[<http://www.agilent.com/cs/library/brochures/Mini-TASK%20AG81%20Brochure.pdf>].